



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ANALÝZA PORUŠOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH VODIČŮ PŘI  
OHÝBÁNÍ**

ANALYSIS OF CRACKING OF ALUMINIUM PROFILES DURING BENDING PROCESS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Ondřej Kalivoda**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Vosynek, Ph.D.**

**BRNO 2017**





## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Bc. Ondřej Kalivoda**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Inženýrská mechanika a biomechanika  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Vosynek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Analýza porušování hliníkových vodičů při ohýbání**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Dané téma pochází z technické praxe. Při určitých konfiguracích technologie ohýbání dochází k porušování hliníkových vodičů, což je nežádoucí. Předmětem diplomové práce bude analýza, proč k porušování dochází. K řešení bude použita, vedle analytických a empirických metod, metoda konečných prvků ve volně dostupném programovém prostředí Salome Meca.

#### **Cíle diplomové práce:**

- Rešeršní studie (analytický a empirický přístup pro navržení ohybu, numerický přístup s využitím MKP)
- Tvorba výpočtových modelů
- Analýza dosažených výsledků

#### **Seznam literatury:**


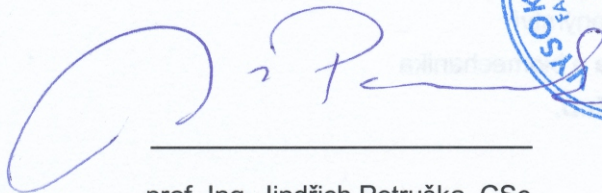
DOWLING, Norman E. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN 01-313-9506-8.

ANDERSON, T. L. Fracture mechanics: fundamentals and applications. 3rd ed. Boca Raton, FL: Taylor, 2005. ISBN 08-493-1656-1.

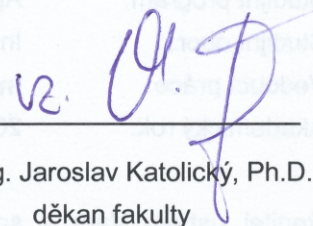


Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt:**

Předkládaná práce vznikla ve spolupráci se společností Siemens, s.r.o. a zabývá se analýzou ohýbání hliníkových plechů. Tyto výrobky pak slouží jako vodiče elektrické energie. Problém nastal při ohybu do  $90^\circ$ , kdy na vnější straně ohybu došlo k porušení. Cílem práce je ověření, zda je ohyb správně navržen a to jak pomocí analytických a empirických vztahů, tak s využitím metody konečných prvků. Z důvodu požadavku, aby numerická simulace proběhla v některém z volně dostupných softwarů, bylo využito programové prostředí Salome-Meca. Výsledky numerické simulace nepotvrdily, že by k porušování mělo dojít. Při hlubší analýze však nastaly pochybnosti, zda je možné výsledky korektně vyhodnotit jen pomocí dat z tahové zkoušky. V závěrečné části jsou pak doporučeny další experimenty, kterých by bylo potřeba ke správné kalibraci kritérií tvárného porušování.

## **Klíčová slova:**

Ohýbání, plasticita, porušování, redukované plastické přetvoření, zpevnění, Salome Meca.

## **Abstract:**

The presented thesis was created in cooperation with Siemens, s.r.o. and deals with the analysis of the bending of aluminium sheets. These products are used as conductors of electrical energy. The problem happened when the bending angle was  $90^\circ$  when there was a violation outside of the bend. The aim of the thesis is to verify whether the bend is correctly designed using analytical and empirical relations and the finite element method. Because of the requirement for running numerical simulation on one of the freely available software the Salome Meca program environment was used. The results of numerical simulation did not confirm that the violation should occur. In deeper analysis appeared doubts whether it is possible to correctly evaluated result only by data from tensile test. In the final part, there are recommended some experiments which would be necessary for the correct calibration of the ductil fracture criteria.

## **Key words:**

Bending, plasticity, fracture, equivalent plastic strain, hardening, Salome Meca.



### **Bibliografická citace:**

KALIVODA, O. *Analýza porušování hliníkových vodičů při ohýbání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D..





## **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Vosynka, Ph.D., s použitím uvedené literatury.

V Brně, dne 20. 5. 2017

.....

Ondřej Kalivoda



## **Poděkování:**

Poděkování patří především panu Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D., za odborné vedení a rady, díky kterým mohla tato práce vzniknout. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Kubíkovi, Ph.D., za mnoho cenných připomínek k problematice porušování.



## OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2. FORMULACE PROBLÉMU .....</b>	<b>16</b>
<b>3. FORMULACE CÍLŮ A ŘEŠENÍ .....</b>	<b>17</b>
<b>4. REŠERŠNÍ STUDIE .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. Přípojnicový systém SIVACON 8PS-LI.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2. Ohýbání .....</b>	<b>25</b>
4.2.1. Napětí při ohybu.....	26
4.2.2. Zbytkové napětí.....	28
4.2.3. Neutrální plocha .....	29
4.2.4. Stanovení délky polotovaru .....	30
4.2.5. Minimální a maximální poloměr ohybu.....	31
4.2.6. Úhel odpružení .....	32
<b>4.3. Porušování materiálu .....</b>	<b>33</b>
4.3.1. Flow curve.....	33
4.3.2. Kritéria porušování .....	34
<b>4.4. Salome-Meca .....</b>	<b>37</b>
4.4.1. Modul Salome-Meca.....	38
4.4.2. Modul Geometry .....	39
4.4.3. Modul Mesh .....	39
4.4.4. Modul Aster .....	40
4.4.5. Modul Efficas .....	41
4.4.6. Modul ParaVis .....	44
<b>5. SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN .....</b>	<b>45</b>
<b>6. VOLBA METODY ŘEŠENÍ .....</b>	<b>47</b>
<b>7. VSTUPNÍ PARAMETRY.....</b>	<b>48</b>
<b>8. ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ.....</b>	<b>49</b>
<b>9. NUMERICKÝ PŘÍSTUP S VYUŽITÍM MKP.....</b>	<b>50</b>



<b>9.1.</b>	<b>Geometrie.....</b>	<b>50</b>
<b>9.2.</b>	<b>Okrajové podmínky .....</b>	<b>51</b>
<b>9.3.</b>	<b>Model materiálu .....</b>	<b>53</b>
<b>9.4.</b>	<b>Sít' konečných prvků.....</b>	<b>57</b>
<b>9.5.</b>	<b>Určení kritické hodnoty přetvoření.....</b>	<b>61</b>
<b>9.6.</b>	<b>Vyhodnocení .....</b>	<b>67</b>
9.6.1.	Průběh napětí a přetvoření .....	67
9.6.2.	Kritérium tažnosti .....	69
9.6.3.	Kritérium redukovaného plastického přetvoření .....	69
<b>10.</b>	<b>NÁVRH VHODNÝCH KALIBRAČNÍK TĚLES .....</b>	<b>73</b>
<b>11.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>74</b>
<b>12.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>75</b>
<b>13.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>79</b>

## 1. ÚVOD

Praxe je nejlepší učitel. Tímto příslovím se snaží držet i Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky (ÚMTMB) na Fakultě strojního inženýrství (FSI) spadající pod Vysoké učení technické v Brně (VUT). Díky této filozofii studenti ve většině předmětů řeší úlohy, které pak mohou reálně vidět v laboratořích a ověřovat své výsledky s experimenty. Na přednáškách a cvičeních však aktivita tohoto ústavu nekončí. Většina pedagogů je v aktivní spolupráci s mnoha firmami a svým studentům tak umožňují nejen různé exkurze do výrobních a vývojových center, ale také podílení se na mnoha zajímavých projektech.

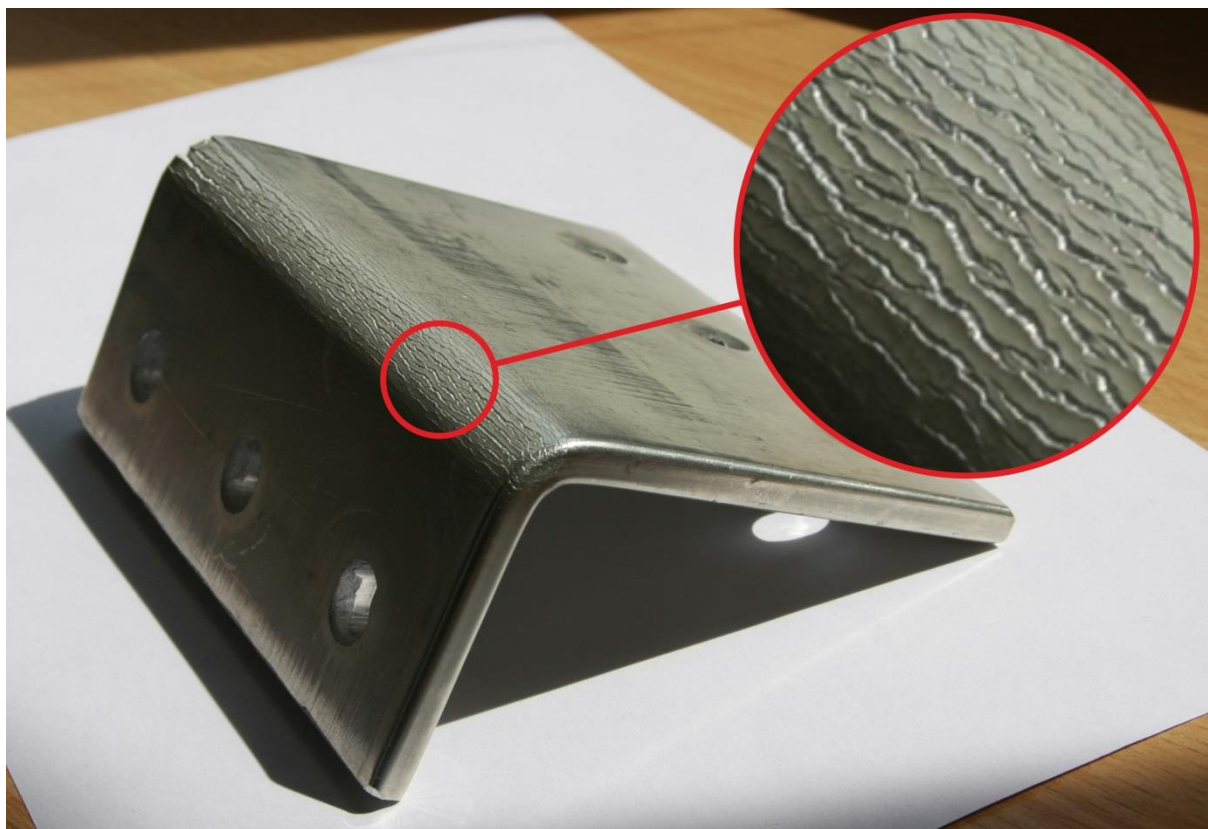
A právě díky tomu vznikla tato diplomová práce. Podnět ke spolupráci dala společnost Siemens, s.r.o. zveřejněním několika témat, do kterých by ráda zapojila i studenty. Konkrétně šlo o odštěpný závod Busbar Trunking Systems v Mohelnici, který se zabývá výrobou přípojnícových soustav.

## 2. FORMULACE PROBLÉMU

Předmětem této práce jsou hliníkové LI přípojnice, sloužící pro přenos elektrické energie. Tyto přípojnice se vyrábí ohýbáním poměrně tlustých plechů. Společnost Siemens, s.r.o. využívá přípojnice v různých geometrických modifikacích.

Problém se však vyskytl u ohýbání hliníku do pravého úhlu. Při tomto technologickém procesu dochází k porušování vodiče na čele ohybu, což je nežádoucí nejen z estetických, ale i funkčních důvodů.

Zadavatel požaduje prověření a zdůvodnění, proč k nežádoucímu jevu dochází a co by měl udělat pro to, aby byl výrobek v pořádku. Toto zdůvodnění žádá jak pomocí empirických vztahů, tak numerickou simulací pomocí MKP. Vzhledem k tomu, že proces ohýbání je již důkladně probádanou disciplínou, lze tuto situaci nazvat úlohou. Jelikož Mohelnický závod nemá své vlastní výpočtářské oddělení, nevlastní ani licence k žádnému komerčnímu konečnoprvkovému softwaru. Z toho důvodu je požadováno, aby numerický výpočet proběhl ve volně stažitelném programu. K řešení byl vybrán open-source software Salome-Meca využívající řešič Code\_Aster.



Obr. 2.1 Hliníková LI přípojnice

### 3. FORMULACE CÍLŮ A ŘEŠENÍ

Po konzultaci s pracovníky společnosti Siemens, s.r.o. a vedoucím diplomové práce byly stanoveny cíle:

- Rešeršní studie (analytický a empirický přístup pro návržení ohybu, numerický přístup s využitím MKP)
- Tvorba výpočtových modelů
- Analýza dosažených výsledků

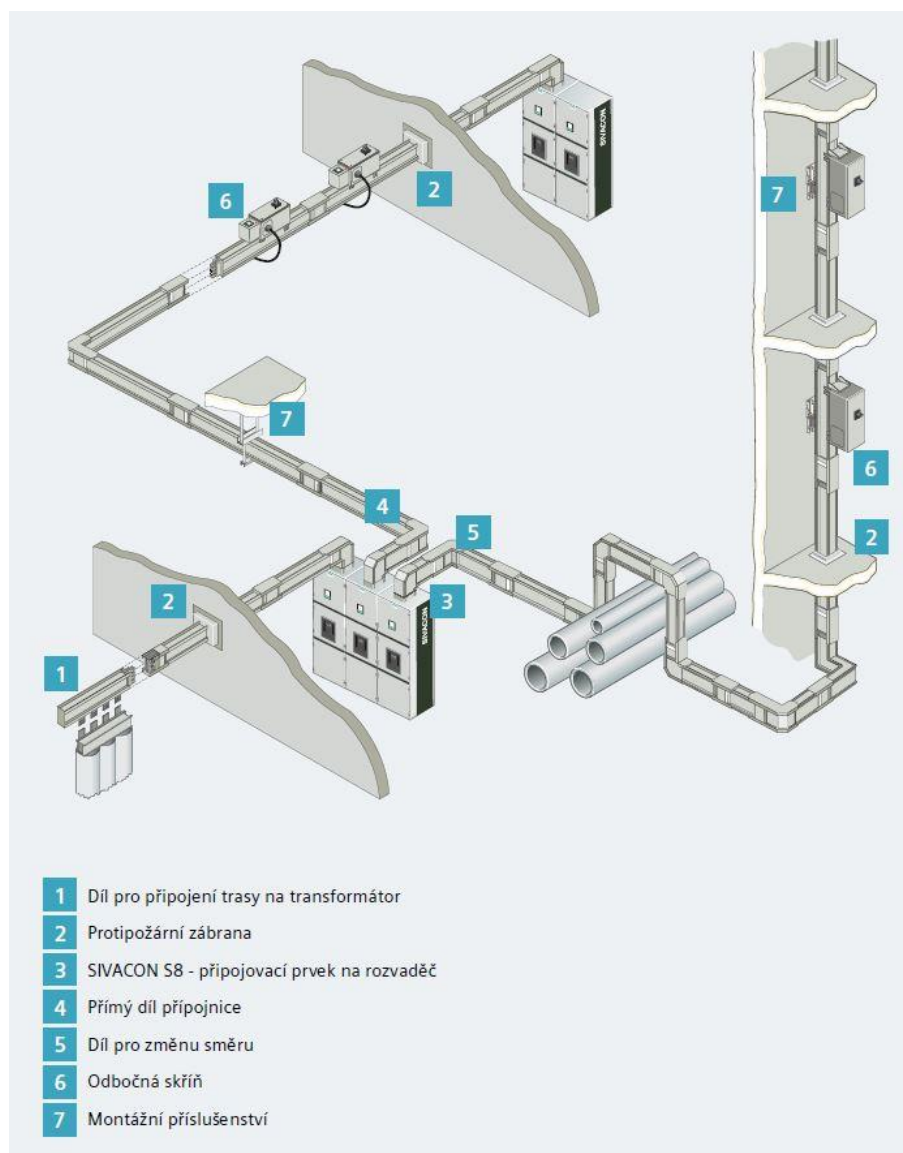
## 4. REŠERŠNÍ STUDIE

Rešeršní část práce má za úkol seznámit čtenáře s teorií nutnou pro kompletní porozumění řešené úlohy. V základu je rozdělena do čtyř částí. V první podkapitole je rozebrán samotný vodič, jeho různé varianty, použití a výhody oproti klasickým kabelům. V druhé části je popsána problematika ohýbání. Třetí část obsahuje některá základní kritéria porušování a v poslední podkapitole bude čtenář seznámen s konečnoprvkovým open-source softwarem Salome-Meca.

### 4.1. Přípojnícový systém SIVACON 8PS-LI

Moderní výroba a průmyslový provoz je v dnešní době odkázaný na flexibilní, spolehlivý a bezpečný zdroj a rozvod elektrické energie. V březnu roku 2015 byl na Mezinárodním veletrhu Amper představen přípojnícový systém SIVACON 8PS-typ LI, který všechny tyto vlastnosti splňuje. Je určen k přenosu a rozvodu proudů v rozmezí od 800 A do 6300 A. Celý soubor přípojnic typu LI je řešen jako kompletní stavebnice rychle sestavitelná i do velmi složitých tras. Všechny prvky jsou modulární, včetně dílů pro změnu směru, připojení na rozvaděče, transformátory nebo odbočné skříně. Přípojnice je tvořena sendvičovou konstrukcí, která zajišťuje minimální úbytky napětí a je tak vhodná pro dlouhé rozvodné trasy, jako jsou například výrobní haly nebo vícepodlažní budovy. Oproti kabelovým instalacím, u kterých je pro doplnění dalšího spotřebiče nutné vždy komplikovaně položit další kabel, představují díky své modulárnosti výraznou úsporu nákladů i času. Stačí pouze nasadit další odbočnou skříňku. [2], [3], [4] Schéma zapojení celého systému je znázorněno na obr.4.1.



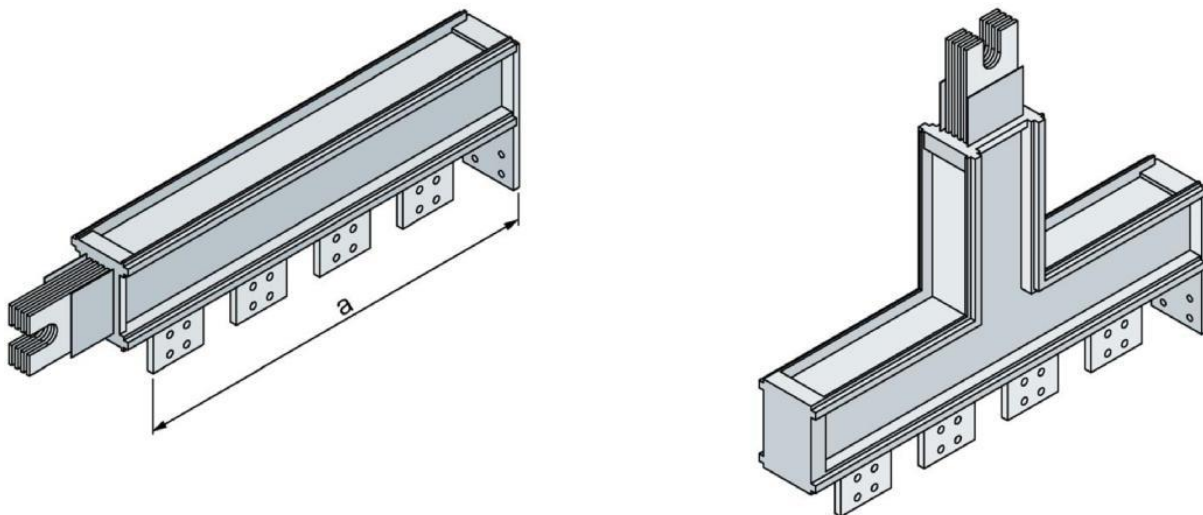


Obr. 4.1 Schéma zapojení celého napájecího systému [4]

Jak je vidno z obr. 4.1, celý systém se skládá ze základních segmentů. Tyto segmenty jsou rozepsány a vyobrazeny níže.

### 1) Díl pro připojení k transformátoru

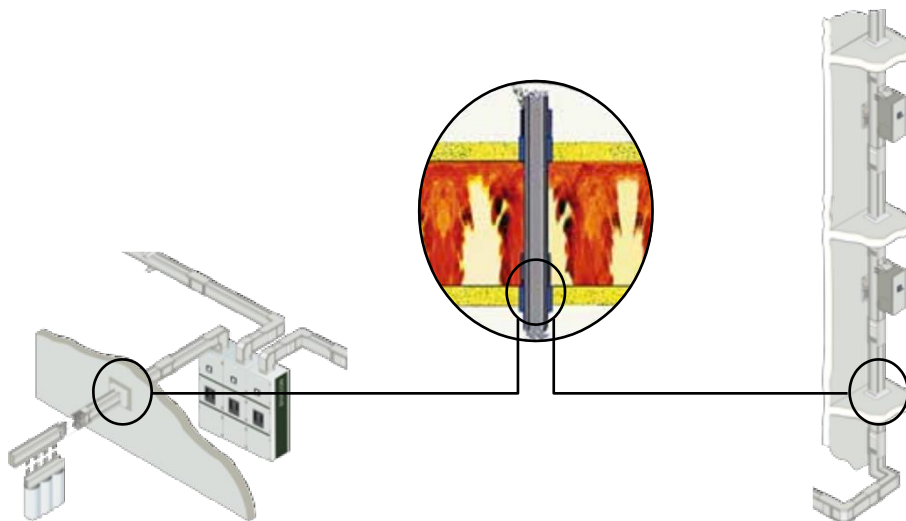
Systém nabízí široký sortiment dílů pro napojení z transformátoru. Jsou použitelné pro libovolný typ transformátoru na trhu. Je možné volit proud, pořadí fází i rozteč praporců. Do 6300 A jsou tyto díly v provedení s bočním nebo spodním vývodem praporců. [4]



Obr. 4.2 Díly pro připojení k transformátoru [3]

### 2) Protipožární zábrana

Evropské normy požadují, aby budova byla koncipována tak, že „konstrukce musí zabránit šíření požáru a dýmu, dále pokud vznikne požár musí se účinně hasit a je nutno maximálně zachraňovat lidské životy a životy zvířat.“ To znamená, že oheň a kouřové zplodiny se nesmí šířit z jednoho podlaží či požárního úseku do dalšího. [4]



Obr. 4.3 Protipožární zábrana [4]

### 3) Připojovací prvek na rozvaděč

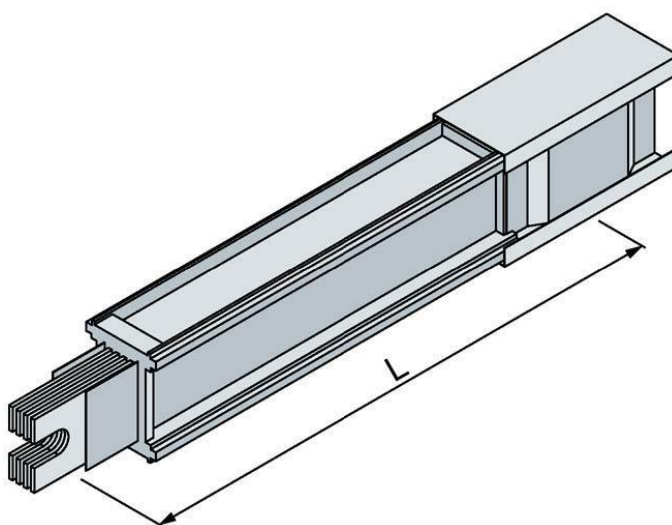
Tento prvek slouží pro připojení trasy k rozvaděči. Problematickou součástí tohoto dílu je hliníkový vodič ohnutý do pravého úhlu. Právě tato komponenta je předmětem celé práce. [4]



Obr. 4.4 Připojení LI na rozvaděč [3]

### 4) Přímý díl

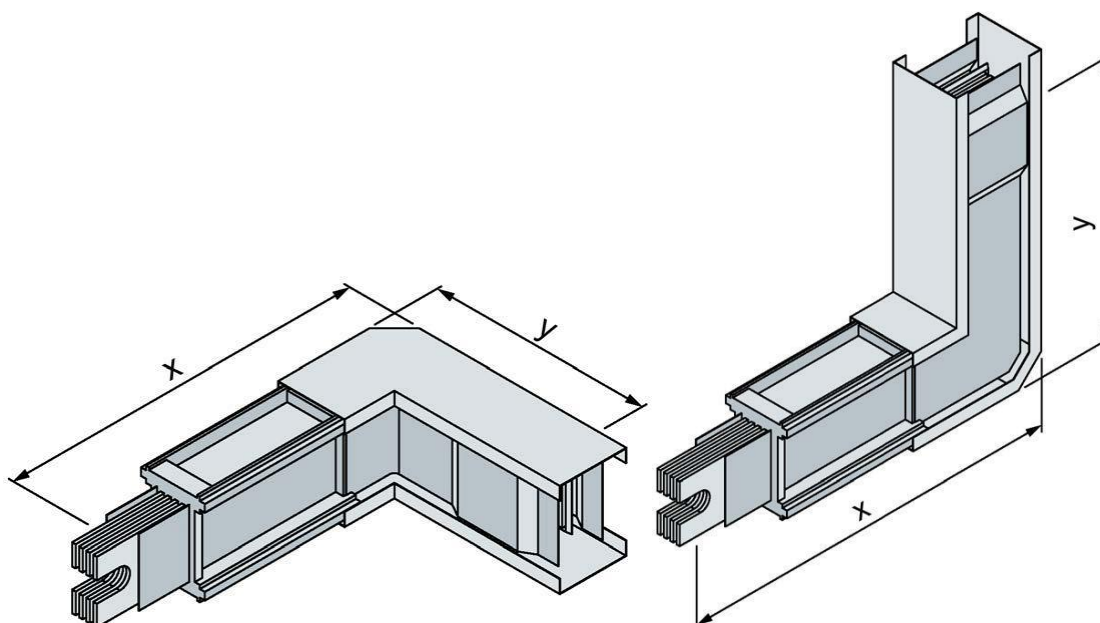
Je to rovný segment vodiče, uložený v sendvičové konstrukci. Tyto prvky se vyrábí ve standardních, nebo volitelných délkách od 0,5 m do 3,00 m (po 1 cm). [4]



Obr. 4.5 Přímý díl [3]

### 5) Díl pro změnu směru

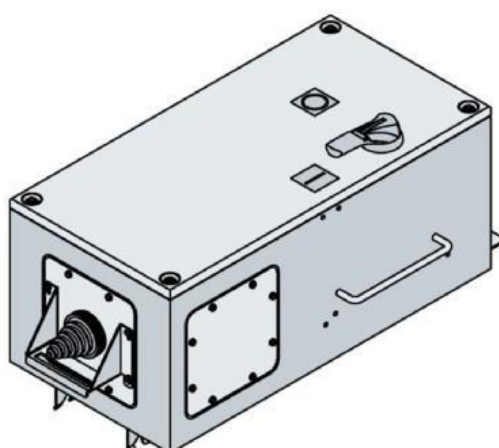
K vytvoření složitých tras jsou za potřebí díly pro změnu směru. K dispozici jsou vertikální i horizontální kolena. [4]



Obr. 4.6 Díly pro změnu směru [3]

### 6) Odbočná skříň

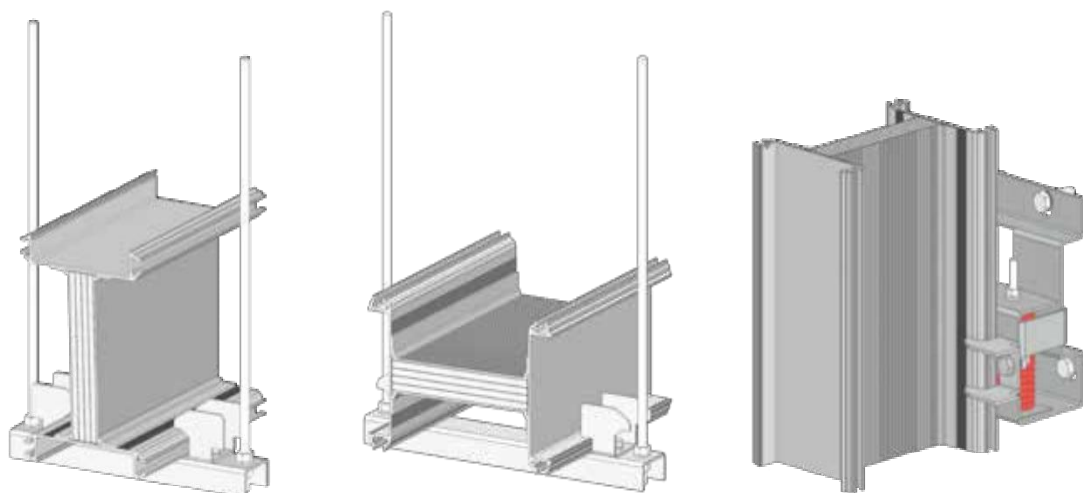
Přípojnicový systém je velmi flexibilní a nahradí částečně potřebu instalovat další rozvaděče. Lze je nasadit téměř na libovolné místo na trase přípojnic a umožní napájet spotřebič v jeho těsné blízkosti. Kabele od spotřebičů lze přivést do odbočné skříně ze strany nebo z čela skříně. [4]



Obr. 4.7 Odbočná skříň [4]

### 7) Montážní příslušenství

Široká nabídka upevňovacích prvků umožňuje instalovat přípojnice LI na stěnu nebo na strop. V případě upevnění ke stropu lze využít také variant orientace vodiče na hraně nebo na plocho. [4]

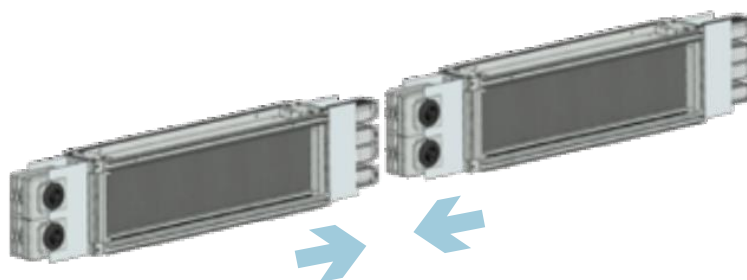


Obr. 4.8. Upevňovací elementy [4]

### Propojení jednotlivých segmentů

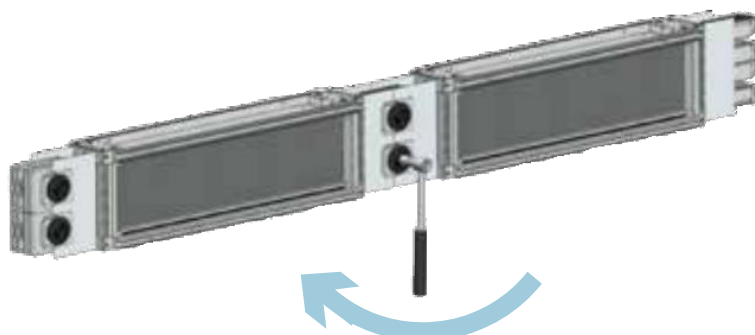
Instalace této stavebnice je velmi jednoduchá a dá se rozdělit do tří kroků [4]:

- 1) Spojované díly se vzájemně srovnají a zasunou se svorníky do háků

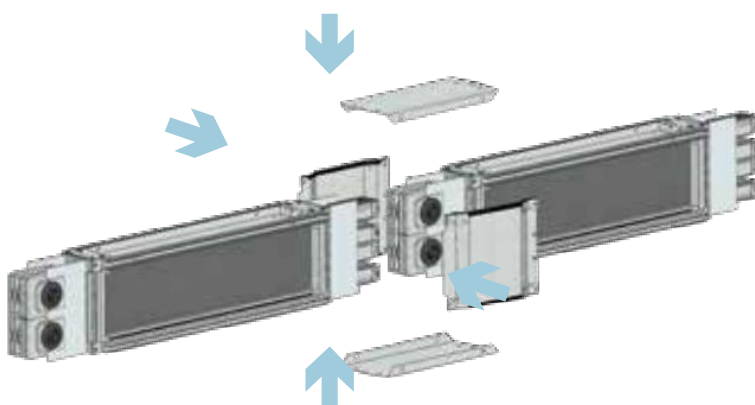




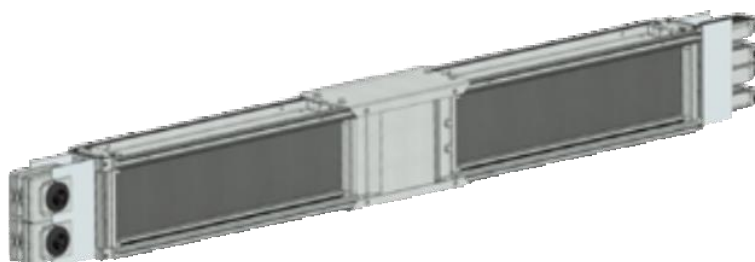
2) Ručním klíčem se matice dotahuje až se předepsaným momentem utrhne. Takto je zajištěno dotažení momentem 40Nm.



3) Nasadí se horní, spodní a dvě boční víka, která se pevně upevní šrouby.



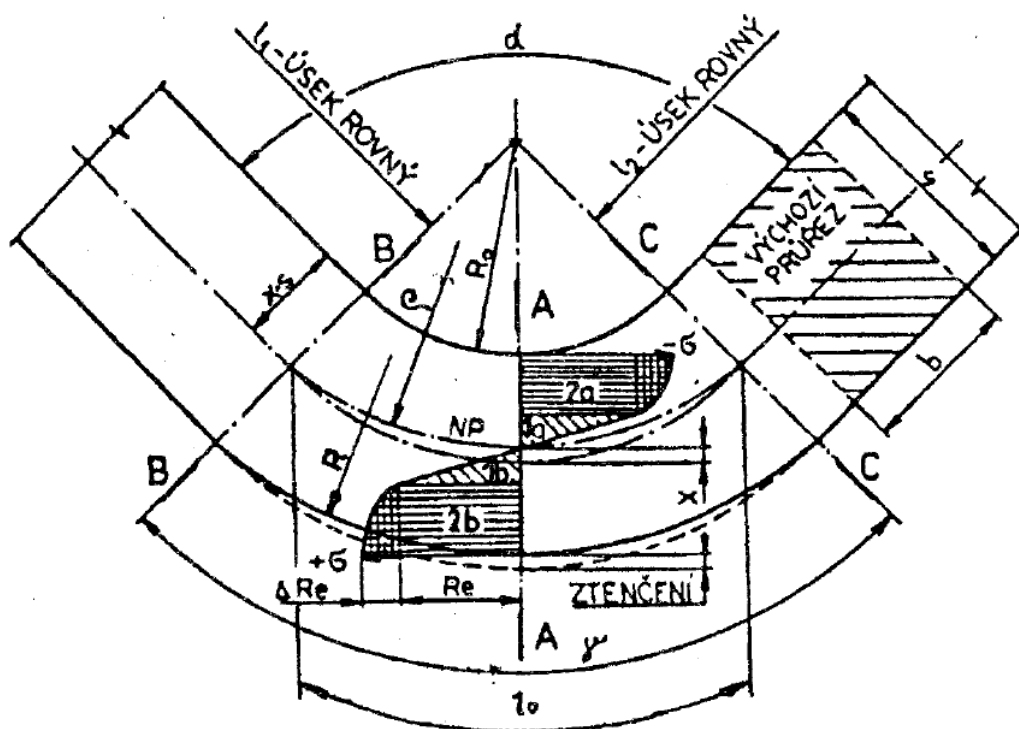
Hotový spoj pak splňuje krytí IP55.



Obr. 4.9 Postup propojení jednotlivých segmentů [4]

## 4.2. Ohýbání

Ohýbání je proces trvalého deformování materiálu, při němž se materiál vzniklým napětím od působící síly buď ohýbá, nebo rovná. Je to jedna z nejpoužívanějších technologických operací ve strojírenské výrobě. Požadovaná součást se získá z plechů, drátů, tyčí nebo jiných polotovarů i několika ohyby. Ohýbání se provádí většinou za studena, ale v případě materiálů tvrdých, křehkých apod. se ohýbá za tepla. Jelikož při ohýbání nedochází k výrazné změně průřezu, řadíme tuto operaci mezi plošné tváření. Při ohýbání dochází k pružně plastické deformaci materiálu. Na velikosti deformace a napětí při ohýbání materiálu mají vliv: kvalita materiálu, jeho tloušťka v místě ohybu, orientace ohybu vzhledem ke směru válcování, poloměr ohybu a velikost ohybových momentů. [5],[6],[7],[8]



Obr. 4.10 Schéma ohýbání [5]

1a, 1b – oblast pružné deformace

2a, 2b – oblast plastické deformace se zpevněním  $\Delta Re$

$x$  – velikost posunutí neutrální plochy (NP) od původní osy průřezu

$R_0$  – poloměr ohybu

$l_0$  – délka ohnutého úseku v neutrální ploše

$\rho$  – poloměr neutrální plochy (NP)

$\gamma$  – úhel ohnutého úseku ( $\gamma = 180 - \alpha$ )

$\alpha$  – úhel ohybu

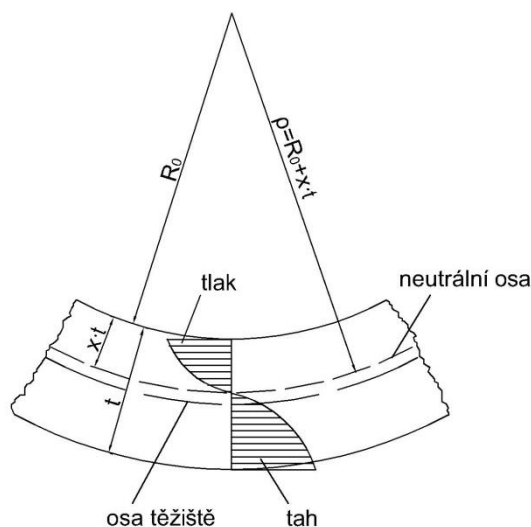
$b$  – šířka materiálu

$t$  – tloušťka materiálu

Rozlišujeme ohýbání úzkých polotovarů ( $b < 3t$ ) a širokých polotovarů ( $b > 3t$ ). Při ohýbání úzkých polotovarů jsou deformace příčných průřezů výraznější než při ohýbání širokých polotovarů. Zařízení používaná k ohýbání jsou různá a používají se podle způsobu ohýbání, velikosti a množství ohýbaných součástí. [7]

#### 4.2.1. Napětí při ohybu

Pro dosažení trvalého ohybu je nutné vyvolání plastické deformace ohybovým napětím nad mezí kluzu  $R_e$ , ale zároveň nesmí být dosaženo určité velikosti plastické deformace, jinak by došlo k porušení soudržnosti tvářeného materiálu. Při ohýbání jsou na krajních vláknech materiálu napětí opačného smyslu. Na vnitřní straně ohybu vzniká tlakové napětí a na vnější straně tahové. [9]



Obr. 4.11 Průběhy napětí v ohýbaném průřezu

Na obr. 4.11 je vidět, že v místě kde se mění tahové napětí na tlakové, je vrstva bez napětí a tedy i bez deformace. Této vrstvě říkáme neutrální plocha.

Pro vysvětlení průběhu napětí po průřezu při ohybu bude uvažováno prutové těleso z ideálně pružně plastického materiálu. Při prostém ohybu vzniká jednoosá napjatost, takže jediné nenulové napětí je normálové napětí. Toto napětí má po průřezu lineární průběh a jeho maximum a minimum leží na vnitřní a vnější straně ohybu.

Průběhy napětí lze rozdělit dle velikosti působícího ohybového momentu do několika stavů. [11]

- A) Prutové těleso je zatíženo ohybovým momentem takovým, že napětí je menší než mez kluzu. V tomto případě jsou v materiálu pouze elastické deformace. Závislost mezi napětím a přetvořením je lineární. Rozložení napětí je znázorněno na obr. 4.12 A. Napětí v libovolném místě průřezu vzdáleném  $a$  od neutrální osy lze spočítat ze vztahu [11]:

$$\varepsilon_1 = \frac{a}{\rho}, \quad \sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1 = E \cdot \frac{a}{\rho} \quad (4.1)$$

kde  $\rho$  poloměr neutrální plochy  
 $E$  modul pružnosti v tahu

Z výše uvedené rovnice lze při dosazení  $a = \frac{h}{2}$  určit extrémní hodnotu napětí. Závislost mezi maximálním napětím a působícím ohybovým momentem je popsána vztahem [11]:

$$\sigma_{max} = \frac{M_o}{W_o} \quad (4.2)$$

kde  $M_o$  působící ohybový moment

$W_o$  modul průřezu v ohybu (pro obdélníkový průřez  $W_o = \frac{bh^2}{6}$ )

B) Prutové těleso je zatíženo momentem, který vyvolává napětí odpovídající mezi kluzu. Průběh napětí je vyjádřen na obr. 4.12 B. Vyjádřením momentu z rovnice 4.2 a dosazením modulu průřezu získáme vztah [11]:

$$M_{el} = \sigma_k \cdot \frac{bh^2}{6} \quad (4.3)$$

kde  $M_{el}$  moment vyvolávající napětí na mezi kluzu

$\sigma_k$  napětí odpovídající mezi kluzu

C) Při dalším zvětšování ohybového momentu dochází k tvorbě plastických deformací ve vrstvách blíže do středu, přičemž okolí kolem neutrální plochy je stále v elastickém stavu (obr. 4.12 C). Velikost ohybového momentu odpovídající dané tloušťce elastické vrstvy lze určit ze vztahu [11]:

$$M_{elp} = \sigma_k \cdot \frac{bh^2}{6} \cdot \frac{1}{2} \left[ 3 - \left( \frac{h_1}{h} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

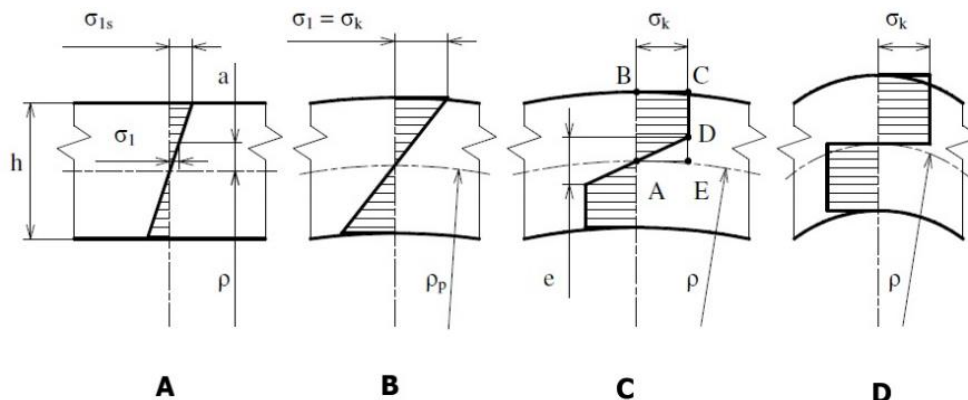
kde  $M_{elp}$  moment vyvolávající elastoplastické napětí

$h_1$  polovina výšky elastického jádra ( $h_1 = \frac{e}{2}$ )

D) Stav, který nastane při zvětšování ohybového momentu do fáze, kdy zplastizuje celé jádro ( $e = 0$ ), nazýváme u ideálně pružně plastického materiálu plastický kloub. Průběh napětí je na obr. 4.12 D. Moment odpovídající tomuto stavu získáme dosazením nulové tloušťky elastického jádra do rovnice 4.4 [11]:

$$M_{pl} = \sigma_k \cdot \frac{bh^2}{4} \quad (4.5)$$

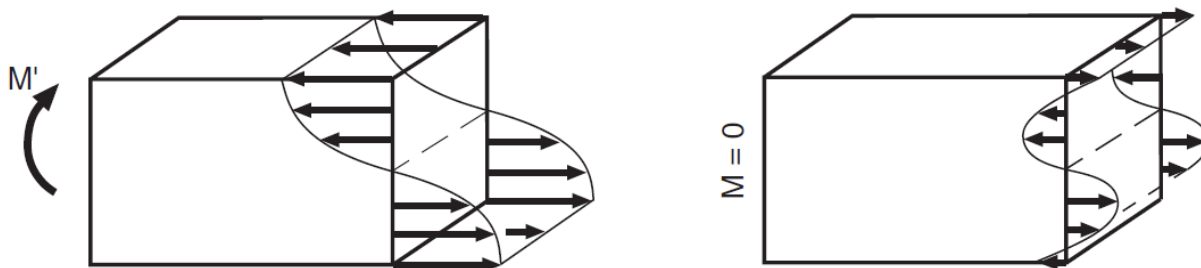
kde  $M_{pl}$  moment vyvolávající plastický kloub



Obr. 4.12 Průběh napětí po průřezu při ohybu [10]

#### 4.2.2. Zbytkové napětí

V předchozí podkapitole byl popisován průběh napětí po průřezu v okamžiku zatížení ohybovým momentem. Nyní se budeme zabývat změnou napětí po následném odlehčení, tedy stavem, kdy vnější ohybový moment  $M = 0$ .



Obr. 4.13 Napětí po průřezu při zatížení a po odlehčení [1]

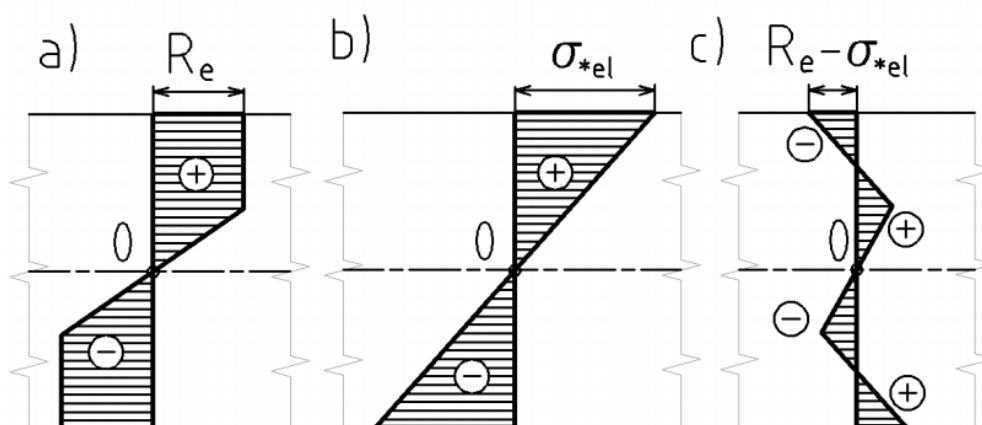
Jak je známo, odlehčování probíhá elasticky. Mějme průřez, který byl při ohýbání částečně zplastizován. Při odlehčování se vlákna v elastické části průřezu vrací do své původní konfigurace. V místech, kde došlo k zplastizování, zůstávají vlákna deformovaná. [12]

Pokud by se materiál choval elasticky, byl by průběh napětí lineární a odpovídal by obr. 4.14 b). Toto napětí nazýváme fiktivní elastické napětí a budeme ho označovat  $\sigma_{el*}$ . [12]

Zbytkové (reziduální) napětí (obr. 4.14 c)) pak lze získat odečtením fiktivního elastického napětí od skutečného napětí při maximálním ohybu (obr. 4.14 a)) podle vztahu [12]:

$$\sigma_{rez} = \sigma_{elp} - \sigma_{el*} \quad (4.6)$$

kde  $\sigma_{rez}$  zbytkové (reziduální) napětí  
 $\sigma_{elp}$  skutečné napětí při maximálním zatížení  
 $\sigma_{el*}$  fiktivní elastické napětí



Obr. 4.14 Určení zbytkového napětí [13]



### 4.2.3. Neutrální plocha

Neutrální plocha je na začátku uprostřed průřezu a při ohýbání se posouvá k vnitřní straně ohybu. U velkých poloměrů ohybu, kde  $R_0 \geq 12t$  se předpokládá, že neutrální plocha je uprostřed tloušťky ohýbaného materiálu a vypočte se ze vztahu [5]:

$$\rho = R_0 + \frac{t}{2} \quad (4.7)$$

kde  $\rho$  poloměr neutrální plochy  
 $R_0$  poloměr ohybu  
 $t$  tloušťka ohýbaného materiálu

U menších poloměrů ohybu ( $R_0 < 6t$ ) se vlivem působení napětí a deformace průřezu neutrální plocha posouvá směrem ke stlačeným vláknům a její poloměr se vypočte ze vztahu [5]:

$$\rho = \left(R_0 + \frac{t}{2}\right) \cdot z_z \cdot z_r \quad (4.8)$$

kde  $z_z = t_1/t$  součinitel ztenčení  
 $z_r = b_1/b$  součinitel rozšíření  
 $b$  původní šířka plechu  
 $b_1$  šířka plechu po ohnutí  
 $t_1$  tloušťka plechu po ohnutí

Při ohýbání širokých pásů plechu, kdy  $b > 3t$ , se poloměr neutrální plochy vypočítá pomocí součinitele  $x$ , který vyjadřuje posunutí neutrální plochy, dle vztahu [5]:

$$\rho = R_0 + x \cdot t \quad (4.9)$$

kde  $x$  součinitel posunutí neutrální plochy

Hodnoty součinitele posunutí neutrální plochy pro ohyb širokých polotovarů pravoúhlého průřezu z měkké oceli do úhlu  $90^\circ$  jsou v tab. 4.1. [5]

$R_0/t$	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	15,0	20,0
$x$	0,32	0,35	0,38	0,42	,0455	0,47	0,475	0,478	0,48	0,424	0,486	0,492	0,498

Tab. 4.1 Hodnoty součinitele posunutí neutrální plochy  $x$  [5]

#### 4.2.4. Stanovení délky polotovaru

Délka polotovaru pro ohýbanou součást se vypočítá jako součet délek přímých úseků a délek oblouků neutrální vrstvy v místě ohybu. Délka neutrální plochy v ohnutém úseku závisí na úhlu oblouku neutrální vrstvy, na poloměru ohybu a tloušťce ohýbaného materiálu dle vztahu [5]:

$$l = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot \rho = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot (R_0 + x \cdot t) \quad (4.10)$$

kde  $l$  délka oblouku neutrální plochy

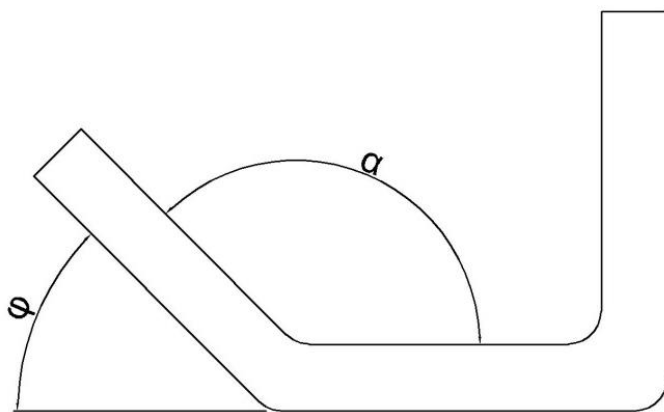
$\pi$  Ludolfovo číslo

$\varphi$  úhel ohnutého úseku

Kromě případu, že se úhel  $\varphi = 90^\circ$ , se spočítá jako

$$\varphi = 180 - \alpha \quad (4.11)$$

kde  $\alpha$  úhel sevřený oběma rameny



Obr. 4.15 Znázornění úhlů při ohybu [9]

Výsledná délka rozvinutého tvaru se pak spočítá dle vztahu [5]:

$$l_c = l + a \quad (4.12)$$

kde  $l = \sum_1^n l_1 + l_2 \dots + l_n$  součet délek oblouků

$a = \sum_1^n a_1 + a_2 \dots + a_n$  součet délek přímých úseků

#### 4.2.5. Minimální a maximální poloměr ohybu

Při překročení minimálního poloměru ohybu dojde v krajních vláknech na vnější straně k porušení materiálu. Velikost tohoto poloměru závisí především na plastičnosti a anizotropii materiálu, způsobu ohýbání, tloušťce plechu a kvalitě povrchu. [5], [9]

V praxi se hodnoty  $R_{min}$  většinou nevyužívají. Z hlediska bezpečnosti se volí poloměry o 20% větší. Minimální poloměr ohybu lze spočítat dle ČSN 22 7340 nebo odvozením dle [14]:

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{R_1 \cdot \alpha - \rho \cdot \alpha}{\rho \cdot \alpha} = \frac{R_1 \cdot \alpha - (R_1 - \frac{t}{2}) \cdot \alpha}{(R_1 - \frac{t}{2}) \cdot \alpha} = \frac{\frac{t}{2}}{R_1 - \frac{t}{2}} = \frac{t}{2 \cdot R_1 - t} \quad (4.13)$$

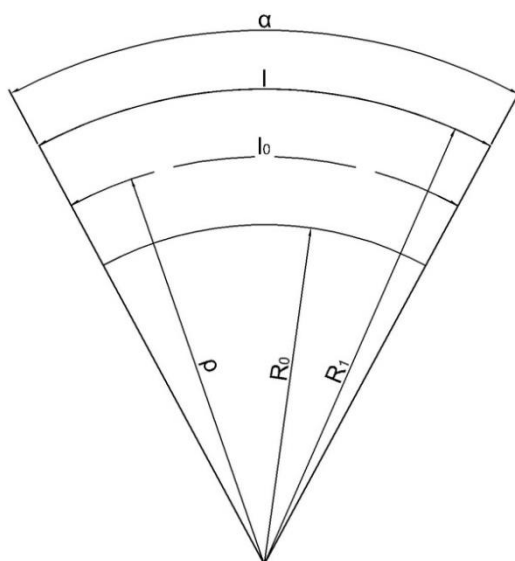
Po vyjádření poloměru  $R_1$  dostáváme

$$R_1 = \frac{t}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} + 1 \right) \quad (4.14)$$

Pro získání minimální přípustné hodnoty poloměru dosadíme do rovnice 4.14 přetvoření odpovídající tažnosti materiálu

$$R_{1min} = \frac{t}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_c} + 1 \right) \quad (4.15)$$

kde  $\varepsilon_c$  mezní přetvoření (přetvoření, které odpovídá tažnosti materiálu)  
 $R_{1min}$  minimální vnější poloměr ohybu



Obr. 4.16 Schéma ohybu [14]

Pozor, v tomto odvození však není zahrnuto posunutí neutrální plochy.

Maximální poloměr ohybu  $R_{max}$  je největší poloměr, při kterém už dochází ke vzniku plastické deformace krajních vláken na tahové straně. Tento poloměr lze spočítat pomocí rovnice [14]:

$$R_{1max} = \frac{t}{2} \cdot \left( \frac{E}{R_e} + 1 \right) \quad (4.16)$$

kde  $E$  modul pružnosti v tahu  
 $R_e$  mez kluzu

#### 4.2.6. Úhel odpružení

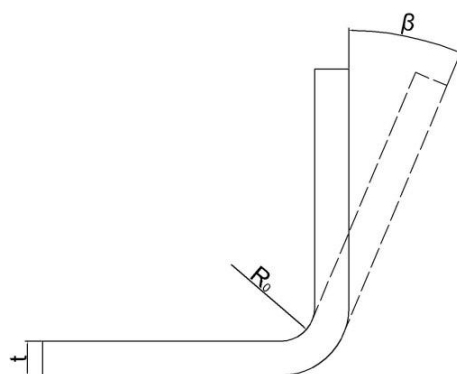
Při ohybu vzniká pružně plastická deformace, a proto přestane-li na těleso působit deformační síla, pak se zruší i elastická složka deformace. To znamená, že materiál má tendenci odpružit se zpět o určitý úhel. Proto aby bylo dosaženo požadovaného úhlu ohybu, je nutno k němu odpružení přičíst a materiál pak takto zatížit. Velikost odpružení lze zjistit pomocí diagramů sestavených na základě praktických zkoušek nebo pomocí rovnic [5]:

-ohýbání do tvaru V

$$\tan(\beta) = 0,375 \cdot \frac{l_v}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E} \quad (4.17)$$

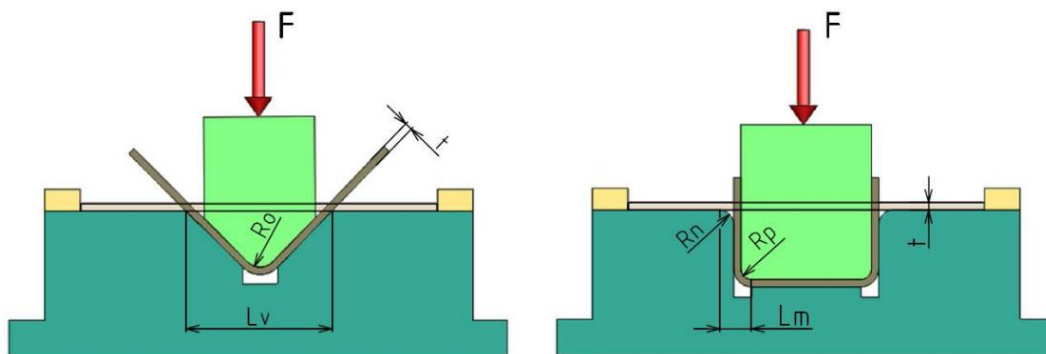
-ohýbání do tvaru U

$$\tan(\beta) = 0,75 \cdot \frac{l_u}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E} \quad (4.18)$$



Obr. 4.17 Schéma odpružení při ohybu [7]

kde	$L_v$	vzdálenost mezi opěrami ohybnice
	$L_m$	rameno ohybu viz obr 4.18, ( $L_m = R_p + R_n + 1,2 \cdot t$ )
	$\beta$	úhel odpružení
	$k$	součinitel určující polohu neutrální plochy ( $R_0/t$ )



Obr. 4.18 Schéma nástrojů při ohýbání do tvaru V a U [6]

### 4.3. Porušování materiálu

Při zatížení tělesa se materiál deformuje nejdříve elasticky a poté plasticky. Po vyčerpání schopnosti materiálu se dále plasticky deformovat dochází k porušování. Mechanismy porušování lze rozdělit na štěpné a tvárné. [15]

- **Štěpné porušení**

Při tomto mechanismu dochází k porušení materiálu téměř ihned po vyčerpání elastické deformace. Vyskytuje se u materiálů jako keramika nebo sklo, ale za nízkých teplot i u většiny kovů. [15]

- **Tvárné porušení**

Tvárnému porušování předchází tvorba velkých plastických deformací. Jsou tedy k vidění hlavně u procesů tváření, kde dochází k velkým tvarovým změnám. [15]

#### 4.3.1. Flow curve

K získání základních materiálových charakteristik se nejčastěji používá zkouška jednoosým tahem, při které se snímá posuv a působící síla. Síla se pak přepočítá pomocí rov. 4.19 na napětí. Posuv se přepočítává přes rov. 4.20 na přetvoření.

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{S_0} \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_{eng} = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.20)$$

kde	$\sigma_{eng}$	smluvní (inženýrské) napětí
	F	působící síla
	$S_0$	počáteční průřez vzorku
	$\varepsilon_{eng}$	smluvní (inženýrské) přetvoření
	L	délka vzorku po deformaci
	$L_0$	počáteční délka vzorku
	$\Delta L$	posuv

Těmto hodnotám říkáme smluvní nebo také inženýrské, jelikož nezahrnují deformaci průřezu během zatěžování. V případech malých deformací je chyba zanedbatelná. Pokud se však dostaneme do oblasti plastických deformací, nelze už s touto křivkou počítat. Je proto potřeba ji pomocí vztahů 4.21 a 4.22 přepočítat na skutečné napětí a logaritmické přetvoření. Tyto hodnoty pak lze používat až do meze pevnosti.

$$\sigma_{real} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (4.22)$$

kde	$\sigma_{real}$	skutečné napětí
	$\varepsilon_{real}$	skutečné (logaritmické) přetvoření

Za mezí pevnosti dochází k tvorbě krčku a tím pádem už nejde o jednoosou napjatost. Zohlednění trojosé napjatosti zahrnul ve své korekci Brigman [16], nebo Mirone [17]. Ti však zkoušeli pouze válcový zkušební vzorek. Korekcí křivky zpevnění z výsledků tahové zkoušky vzorku s obdélníkovým průřezem se věnoval Zhang [18]. Dalšími přístupy jsou použití inverzní numerické simulace, optické metody a další. Křivku zpevnění  $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}^p$  (redukované napětí – redukované plastické přetvoření), kterou takto získáme, nazýváme „flow curve“ a je jedním z nejdůležitějších vstupů do elastoplastických simulací. [19]

#### 4.3.2. Kritéria porušování

V současné době existuje celá řada kritérií porušování. Problém většiny z nich je však použitelnost v praxi. Sofistikovaná kritéria, která by měla velmi přesně popsat nejen mezní hodnotu, ale také místo poškození, vyžadují mnoho experimentů a simulací, což může být náročné jak časově, tak i finančně. Naopak ty jednodušší, které nestojí příliš času ani peněz, mohou mít nízkou vypovídající hodnotu. Níže bude stručně popsáno několik vybraných kritérií. [15]

##### Kritérium redukovaného plastického přetvoření

Toto kritérium je implementováno téměř ve všech komerčních konečnoprvkových softwarech. Vyniká zejména svou jednoduchostí, protože ke kalibraci stačí pouze jedna tahová zkouška. K velkým nevýhodám naopak patří omezená použitelnost. Toto kritérium totiž nijak nezohledňuje vliv triaxiality. Pro přesnost výsledků je tedy nutné, aby napěťové stavy v materiálu byly blízké napěťovým stavům při kalibraci. Kritérium říká, že k porušení dojde, když redukované plastické přetvoření  $\bar{\varepsilon}^p$  dosáhne kritické hodnoty  $\bar{\varepsilon}_f$ . [20]

$$\bar{\varepsilon}^p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}^p : \dot{\varepsilon}^p dt = \bar{\varepsilon}_f \quad (4.23)$$

kde  $\varepsilon^p$  tenzor plastického přetvoření  
 $\bar{\varepsilon}_f$  lomové přetvoření

##### Kritérium Johnson-Cook

Tento model porušení a materiálu se používá při vysokých rychlostech deformace a dokáže také zahrnout vliv teploty. Zpevnění tohoto modelu materiálu je dáno vztahem [20]:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*] [1 - T^{*l}] \quad (4.24)$$

Další vztahy potřebné k určení všech proměnných jsou

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (4.25)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (4.26)$$

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (4.27)$$

kde	$\bar{\sigma}$	redukované napětí
	A,B,C,l	materiálové konstanty
	n	exponent zpevnění
	$\dot{\varepsilon}^*$	bezrozměrná rychlost redukovaného plastického přetvoření
	$\dot{\varepsilon}_0$	referenční rychlost plastického přetvoření
	$T^*$	homologická teplota
	$T$	aktuální teplota
	$T_{room}$	referenční teplota
	$T_{melt}$	teplota tavení
	$\eta$	triaxialita
	$\sigma_m$	střední napětí

Lomové přetvoření  $\bar{\varepsilon}_f$  je dáno rovnicí

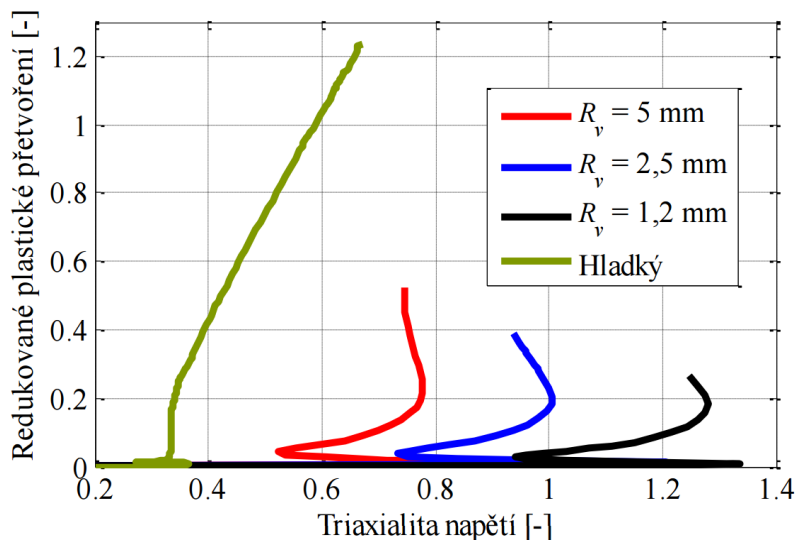
$$\bar{\varepsilon}_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)][1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}^*)][1 + D_5 T^*] \quad (4.28)$$

kde  $D_1 - D_5$  materiálové konstanty

K porušení dojde tehdy, když lomový parametr  $D$  dosáhne jednotkové velikosti.

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_f} = 1 \quad (4.29)$$

Novým podstatným parametrem, který do rovnice vstupuje oproti předchozímu kritériu je triaxialita. Tento parametr zohledňuje o jaký typ napěťového stavu se jedná. Závislost redukovaného plastického přetvoření na triaxialitě popsal ve své práci Kubík [20] při simulování tahové zkoušky válcového vzorku s různým poloměrem vrubu. Při svém výzkumu došel ke grafu dle obr. 4.19.



Obr. 4.19 Průběh triaxiality napětí u tahových zkoušek válcových vzorků [20]

Z křivky triaxiality se pak pomocí rov. 4.30 určí střední hodnota. Pro každou zkoušku se tak získá jedna hodnota triaxiality.

$$\eta^{av} = \frac{1}{\bar{\epsilon}^f} \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \eta(\bar{\epsilon}^p) d\bar{\epsilon}^p \quad (4.30)$$

### Kritérium Cockcroft-Lathan-Oh

Kritérium vzniklo, když Oh [21] modifikoval původní Cockcroftovo a Lathanovo kritérium [22] tím, že normalizoval první hlavní napětí  $\sigma_1$  redukovaným napětím  $\bar{\sigma}$ . Je definováno tak, že k porušení materiálu dojde, když hodnota parametru poškození  $D$  dosáhne kritické hodnoty  $D_{CLO}$ .

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}^p = D_{CLO} \quad (4.31)$$

Toto kritérium není vhodné pro vysoké rychlosti deformace. Našlo však široké uplatnění v oblasti objemového tváření. [15], [20]

Existuje ale řada dalších, mnohdy přesnějších kritérií, ke kterým je však většinou potřeba více experimentů. Za zmínku stojí kritérium Xue-Wierzbicki [31] nebo jeho pozdější modifikace Bai-Wierzbicki [32], ve kterém kromě triaxiality figuruje další parametr, Lodeho úhel  $\theta$ , který lze vyjádřit pomocí Lodeho parametru  $\mu$ . Ty jsou definovány následujícími rovnicemi:

$$\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4.32)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\mu}{\sqrt{3}}\right) \quad (4.33)$$

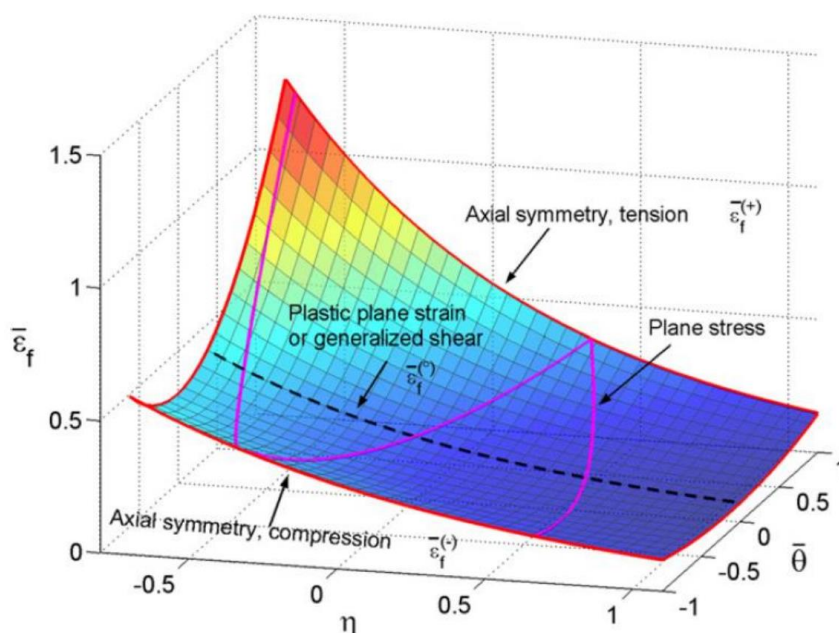
kde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  hlavní napětí

V některých případech je praktičtější Lodeho úhel normalizovat dle vztahu:

$$\bar{\theta} = -\frac{6\theta}{\pi} \quad (4.34)$$



Lodeho parametr stejně jako normalizovaný Lodeho úhel nabývá hodnot v intervalu od  $-1$  do  $1$ . Na obr. 4.20 je znázorněno, jak vypadá váhová funkce a jaká napjatost odpovídá jakému normalizovanému Lodeho úhlu.



Obr. 4.20 Lomové přetvoření kritéria Bai-Wierzbicki [32]

#### 4.4. Salome-Meca

SALOME patří mezi open-source softwary sloužící k pre- a post-processingu pro numerické simulace. Název Salome-Meca je používán ve spojení s MKP řešičem Code\_Aster. Samotné prostředí jako takové je však distribuováno pod názvem SALOME. Výraz open-source neboli „otevřený kód“ znamená, že je software nejen legální a volně šiřitelný, ale je možné také editovat jeho zdrojový kód. Vzhledem k ceně běžných licencí komerčních konečnoprvkových softwarů je tohle obrovská výhoda SALOME. Menší firmy, firmy zabývající se převážně konstrukcí, živnostníci nebo studenti tak mohou využívat plný potenciál tohoto softwaru bez nutnosti velkých investic. Jedinou menší překážkou je snad jen kompatibilita programu pouze s operačním systémem Linux. To se však dá vyřešit použitím některého z volně stažitelných virtualizačních softwarů, např. Oracle VM VirtualBox. SALOME je distribuováno pod licenčními podmínkami GNU LGPL. Program jako celek je poskládán z několika modulů, z nichž každý má svou funkci a lze jej používat separátně bez nutnosti celkových analýz. [23], [24], [25], [26], [27]

Úkony ke kterým se SALOME nejčastěji používá jsou:

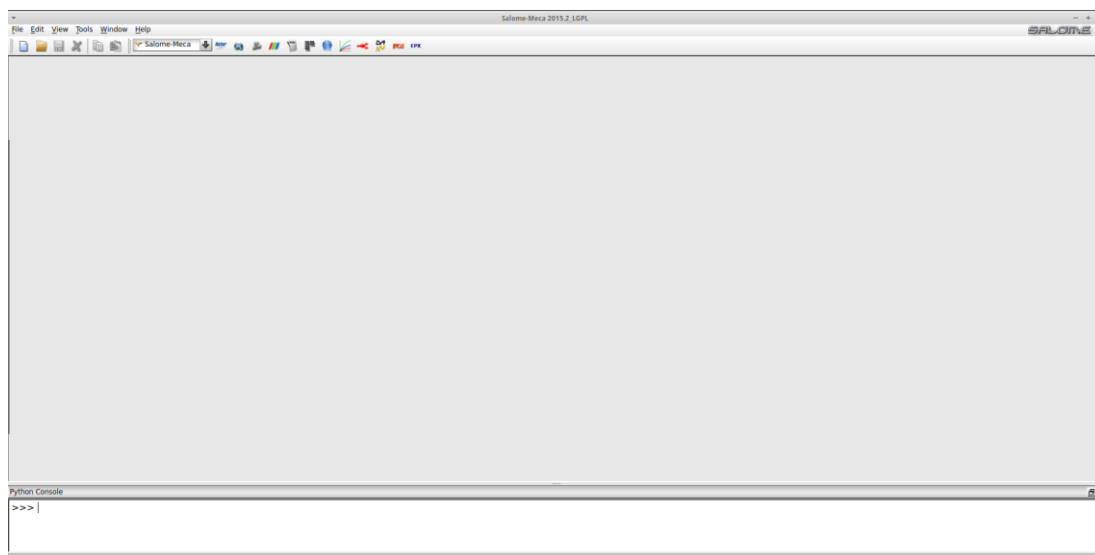
- tvorba a modifikace CAD modelů
- import/export CAD modelů
- tvorba a úprava sítě konečných prvků
- import/export sítě konečných prvků
- provádění výpočtů pomocí externích řešičů
- zobrazování výsledků
- a další...

Celý software je napsán v programovacím jazyku Python, takže zkušenější uživatelé mohou využívat všechny funkce psaním přímo do příkazového řádku. Pro začátečníky je však tvorba složitějších simulací poměrně náročná a to zejména kvůli prakticky žádné oficiální podpoře a slabé jazykové integraci. (ANG,FRA,JAP). [23]

Jak již bylo zmíněno, software je složen z jednotlivých modulů, přičemž každý z nich slouží k některému z výše uvedených úkonů. V dalších podkapitolách budou stručně představeny všechny důležité moduly a orientace v nich.

#### 4.4.1. Modul Salome-Meca

Tento modul automaticky naskočí při spuštění softwaru. Kromě načítání a ukládání jednotlivých projektů nemá žádnou další podstatnou funkci. Modul podporuje formát .hdf, který je balíkem celého projektu. Takže pokud není potřeba uložit nebo nahrát pouze geometrii, síť nebo jinou část analýzy, zahrnuje tento soubor vše z provedené studie. Po načtení, nebo založení nového projektu lze pokračovat přepnutím na některý z dalších modulů. Přepínání je přehledně realizováno pomocí rozbalovacího okna nebo kliknutí na příslušnou ikonu. Pro zblhlé uživatele je pak ve spodní části okna k dispozici příkazový řádek.

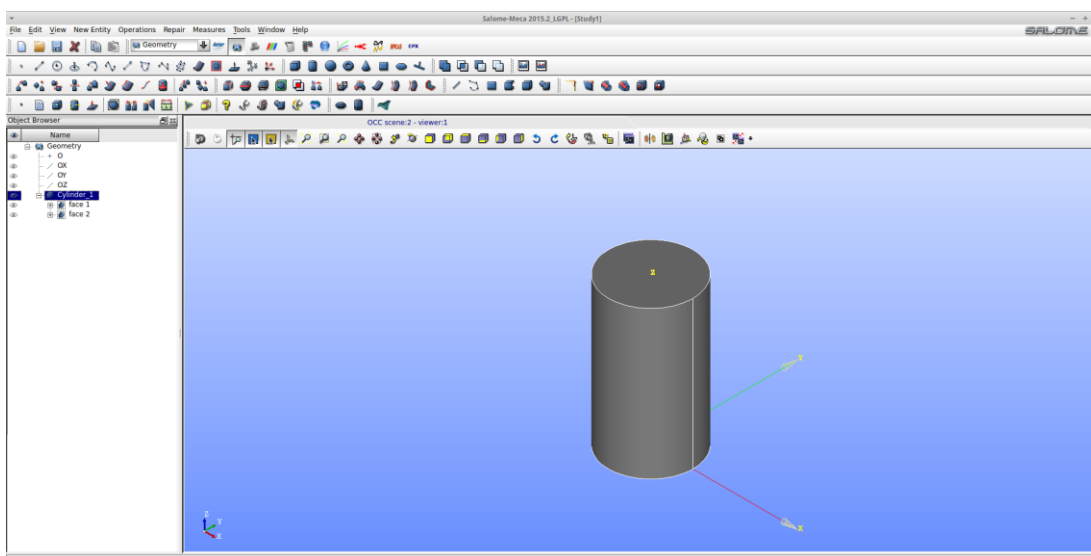


Obr. 4.21 Modul Salome-Meca

#### 4.4.2. Modul Geometry

Tento modul už je podstatně užitečnější a pokud není k dispozici model k importu, tak se práci v něm nelze vyhnout. Importovat lze soubory ve formátech BREP, STEP, IGES, STL nebo XAO, avšak pro další práci v SALOME je většinou potřeba model ještě nějakým způsobem upravit.

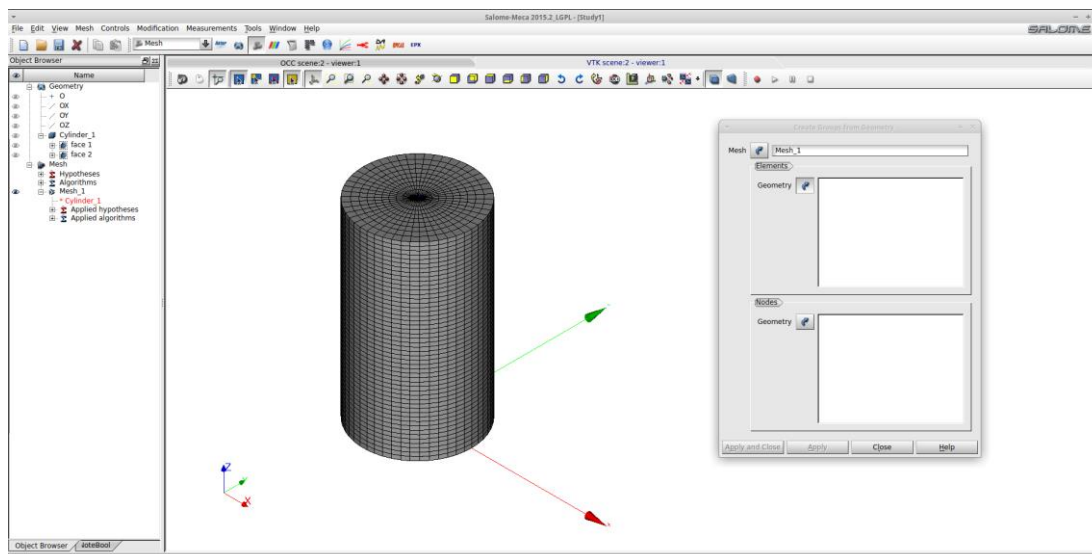
Tvorba geometrie v tomto modulu je velice podobná některým komerčním 3D modelářům. Náčrt, vysouvání, rotování, to vše a mnoho dalších základních funkcí lze intuitivně najít v horní liště nebo přímo použít příslušnou ikonu. Jak už bývá zvykem, v levé části okna se nachází strom vytvořených entit. Až na občasnou nestabilitu, což je ale problém celého softwaru, je tento modul dobře zpracovaný a určitě si našel řadu spokojených uživatelů.



Obr. 4.22 Modul Geometry

#### 4.4.3. Modul Mesh

Po vytvoření geometrie následuje při řešení MKP úloh zpravidla tvorba sítě konečných prvků. Pokud je již síť nachystána, je možné ji také přímo importovat. Tento modul podporuje formáty MED, UNV, STL, DAT, CGNS, SAUV nebo GMF. Tvorba a úprava sítě nabízí spoustu možností a algoritmů. K dispozici jsou 1D, 2D, 3D prvky, jejich lineární a kvadratické verze a mnoho dalších modifikací pro konkrétní typy analýz. Síť lze jednoduše globálně nebo lokálně zhušťovat a při dobré přípravě skupin entit lze vytvořit i ideálně mapovanou síť.



Obr. 4.23 Modul Mesh

#### 4.4.4. Modul Aster

Modul Aster slouží k přípravě a spouštění makra pro výpočet. Vstupem do řešiče Code\_Aster je textový COMM soubor. V podstatě existují tři možnosti jak tento soubor vytvořit.

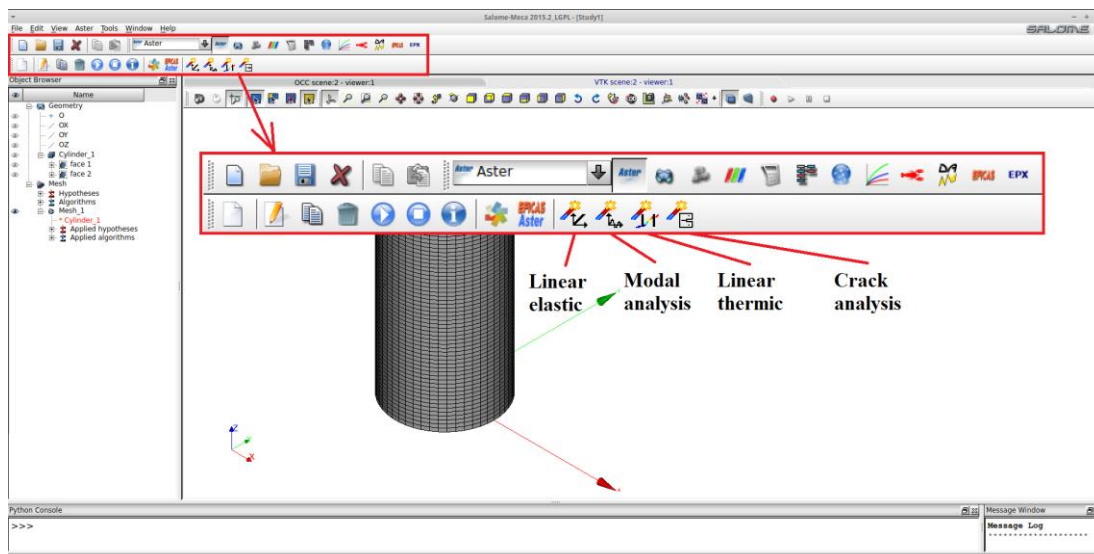
První možností je externě napsat skript v jakémkoliv textovém editoru. Tato metoda je velmi pracná a pro začínající uživatele nevhodná. Samostatné psaní vyžaduje hluboké znalosti nejen všech příkazů ale také jejich syntaxe.

Druhou možností je využít některý ze čtyř předpřipravených průvodců. Pro tuto variantu stačí kliknout na ikonu požadovaného průvodce v horním panelu. Tímto způsobem lze připravit řešič pro:

- Lineárně elastickou strukturální analýzu
- Modální analýzu
- Lineární termální analýzu
- Analýzu šíření trhlin

Tento způsob je nejjednodušší, avšak se značně omezeným použitím. Například při lineárně elastické strukturální analýze lze zadat jako okrajovou podmínku pouze omezení posuvů a tlak na plochu. Pokud tedy není simulována tahová zkouška, nelze se vyhnout další úpravě skriptu.

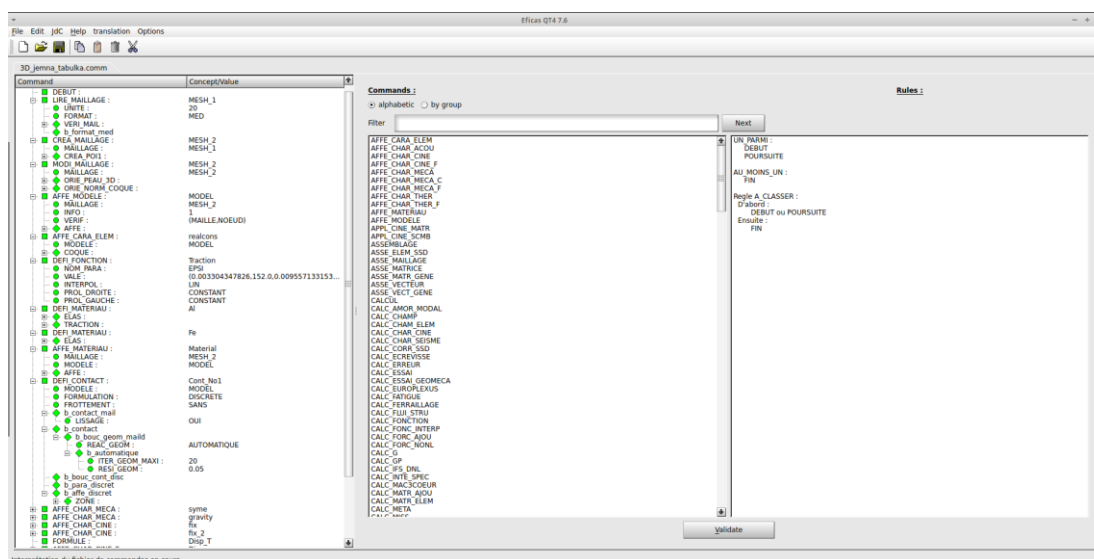
A právě k takové úpravě, nebo rovnou vytvoření celého skriptu, je nejrychlejší a nejjednodušší třetí možnost, což je použití modulu Efficas.



Obr. 4.24 Modul Aster

#### 4.4.5. Modul Efficas

Modul Efficas se spouští v samostatném okně, které je přehledně rozděleno do tří částí. V levé třetině je strom s příkazy, které se takto zapíší do COMM souboru. Příkazy jsou přehledně skládány pod sebe a ve většině případů se dále větví. Uprostřed je seznam příkazů, které stačí poklikáním přiřadit do stromu a dále pak vyplnit požadované parametry. Pro vyhledání požadovaného příkazu je tedy potřeba znát alespoň jeho první písmena. V pravé části je pak seznam několika dalších doporučených podpříkazů, na které se ten námi zvolený obvykle větví. Při potřebě některých příkazů odkazovat se na geometrii, jako například definování okrajových podmínek, lze jednoduše kliknout v modulu Mesh na příslušnou entitu a ta se pak sama načte do stromu. Při pochopení systému sestavování skriptu, se už tak jen zbývá vyrovnat s faktem, že celý jazyk Code\_Aster vychází z francouzštiny. Význam většiny příkazů se tak stává nefrankofonním uživatelům naprosto neprůhledný.



Obr. 4.25 Modul Efficas

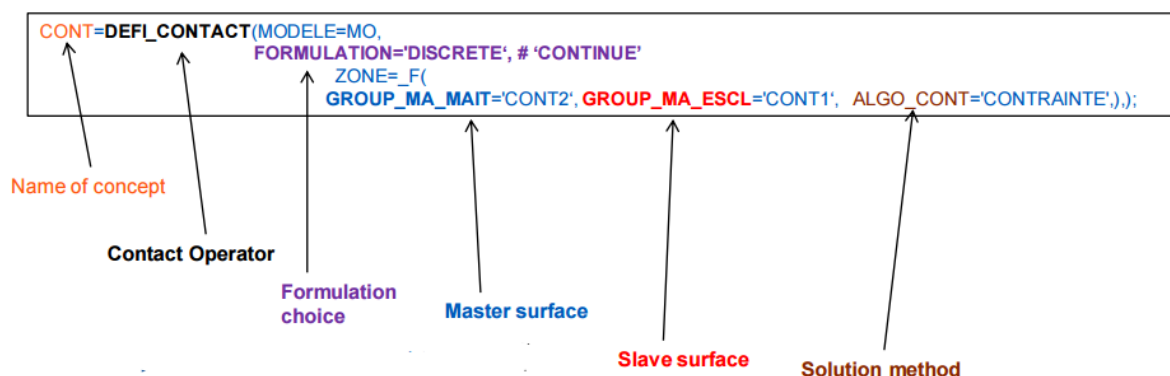
### Základní struktura skriptu

V jazyku Code\_Aster lze jako v každém jiném programovacím jazyku tvořit různě složité úkoly s využitím cyklů, všemožných podmínek a funkcí, které vyžadují mnoho zkušeností a praxe. Jsou však příkazy, které tvoří jakousi základní strukturu a neměly by chybět v žádném skriptu. Obecně jsou to následující:

<i>DEBUT</i>	-	Začátek
<i>DEFI_MATERIAU</i>	-	Definování materiálu
<i>LIRE_MALLAGE</i>	-	Načte síť
<i>AFFE_MODELE</i>	-	Přiřadí vlastnosti modelu (3D, RN, RD, ...)
<i>AFFE_MATERIAU</i>	-	Přiřadí materiál
<i>AFFE_CHAR_MECA</i>	-	Definuje okrajové podmínky
<i>MECA_STATIQUE</i>	}	- Řeší lineární/nelineární/dynamické úlohy
<i>STAT_NON_LINE</i>		
<i>DYNA_NON_LINE</i>		
<i>CALC_CHAMP</i>	-	Určí, které veličiny mají být spočítány
<i>IMPR_RESU</i>	-	Uloží výsledky
<i>FIN</i>	-	Konec

Podrobnější vysvětlení dalších možností příkazů by bylo rozsáhlé a není předmětem této práce. Níže bude popsáno pouze jedno z úskalí nelineárních úloh a to nastavení kontaktu.

Definování kontaktu má na starost příkaz *DEFI\_CONTACT* a jeho základní parametry včetně syntaxe jdou vidět na obr. 4.26.



Obr. 4.26 Základní nastavení kontaktu

Definování kontaktu je možné pomocí dvou základních formulací. V následujících odstavcích budou stručně vysvětleny rozdíly, výhody a nevýhody obou formulací.

FORMULATION='DISCRETE'

Podmínky kontaktu jsou aplikovány na již diskretizovaný systém. Dá se tedy měnit pouze rozlišení lineárního systému  $K \cdot u = f$ .

Tři základní kroky Newtonovy metody:

- 1) Sestavení systému lineárních rovnic
- 2) Integrace konstitutivního zákona
- 3) Analýza konvergence

Podstata formulace DISCRETE spočívá v přidání jednoho kroku mezi 1) a 2). Přidaný krok je něco jako postprocessing řešení bez zahrnutí kontaktu. Cílem tohoto kroku je aplikování podmínek kontaktu a tření do systému. [27]

FORMULATION='CONTINUOUS'

Diskretizace dle principu virtuálních prací. Přístup k řešení nelineárního systému spočívá v oddělení nelinearity nebo zlinearizování systému. Když jsou všechny nelinearity odděleny, zbývají v Newtonově algoritmu běžné nelinearity (materiál). Každá Newtonova iterace při formulaci CONTINUOUS nestojí více paměti, ale k výpočtu je potřeba více iterací a proto je časově náročnější. [27]

ZONE-MASTER/SLAVE

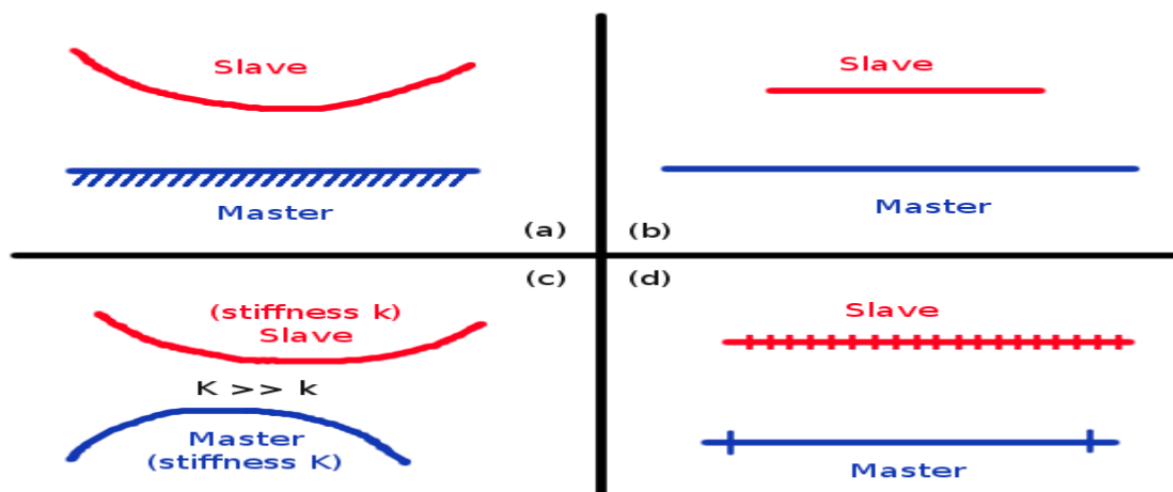
Druhým parametrem, který je potřeba definovat, jsou entity, které přijdou do kontaktu. Zadávají se dva typy čar/ploch, které tvoří kontaktní pár. Jedná se o MASTER a SLAVE.

MASTER bývá tuhé těleso a SLAVE poddajné. Pokud jsou tělesa stejně tuhá, dají se rozdělit následovně [27]:

MASTER-hrubá síť, SLAVE-jemná síť

MASTER-lineární prvky, SLAVE-kvadratické prvky

MASTER-větší povrch, SLAVE-menší povrch



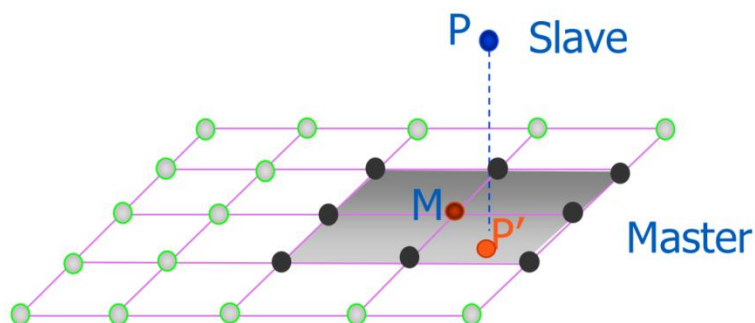
Obr. 4.27 Rozdělení kontaktních dvojic podle  
a),c)tuhosti, b)velikosti povrchu, d) jemnosti sítě [27]



Pokročilejší nastavení kontaktu obsahuje také možnost výběru algoritmu párování:

APPARIEMENT='MAIT\_ESCL'- uzel na plochu (node to face)

APPARIEMENT='NODAL'- uzel na uzel (node to node), možné pouze u formulace DISCRETE

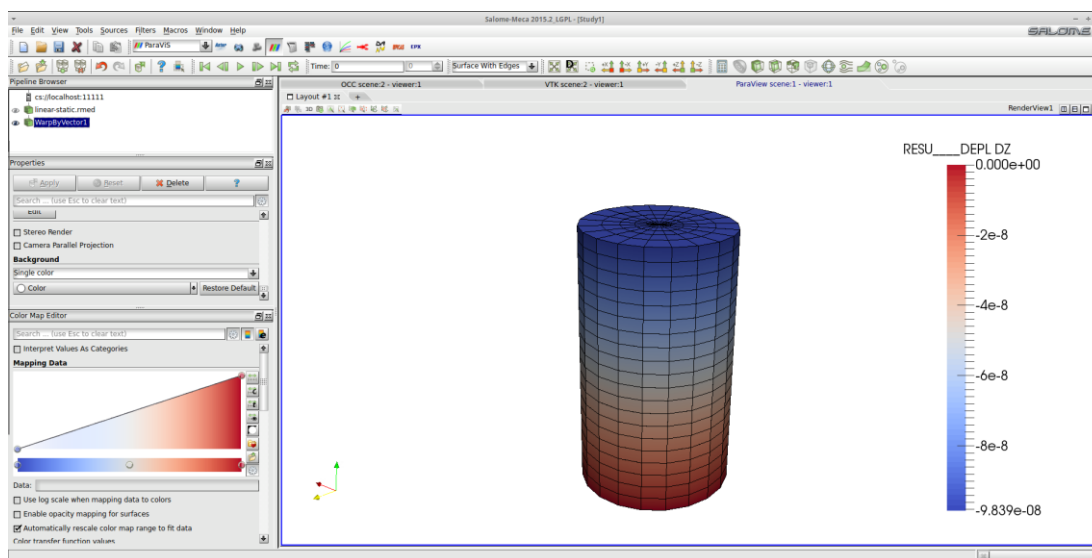


Obr. 4.28 Algoritmus párování MAIT\_ESCL [27]

K řešení kontaktu jsou zde k dispozici klasické algoritmy, které jsou známé z jiných komerčních softwarů. Patří mezi ně pokutový přístup, metoda Lagrangeových multiplikátorů nebo Augmented Lagrange vždy lehce upraveny dle zvolené formulace.

#### 4.4.6. Modul ParaVis

Po dokončení výpočtu je čas přejít k vyhodnocování. Právě k tomu slouží modul ParaVis. Při hledání rad a návodů k tomuto modulu lze často narazit na název ParaView. Netřeba v tom hledat rozdíly. ParaView je totiž autonomní software a až implementovaný v SALOME získal název ParaVis. Sem je potřeba naimportovat RMED soubor, který je výstupem řešice Code\_Aster. V tomto modulu nechybí nic ze standardních funkcí, jako je vypisování výsledků po definované cestě, generování tabulek s výsledky nebo tvorba grafů s požadovanými závislostmi. Jako odlišnost od komerčních softwarů je pouze možnost zobrazovat jen ty veličiny, které byly zadány ve skriptu. Uživatel si proto musí již před spuštěním výpočtu rozmyslet, které veličiny bude chtít vyhodnocovat.



Obr. 4.29 Modul ParaVis



## 5. SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN

Pro zahrnutí všech veličin důležitých pro řešení dané situace je potřeba postupovat sofistikovaným systémovým přístupem. Podstatou tohoto přístupu je vytvoření systému podstatných veličin. Struktura systému se skládá z devíti podmnožin  $S_i$  ( $i=0$  až 8), definovaných dle [29], [30].

- $S_0$  - Veličiny popisující okolí

Proces ohýbání probíhá na ohýbacím stroji Stierli-Bieger 300NC. Toto zařízení je umístěno ve výrobní hale společnosti Siemens, s.r.o v Mohelnici. V hale je udržována téměř konstantní teplota okolo 20°C. Ohýbačka se skládá z mnoha částí, avšak pro řešení dané situace jsou důležité zejména ohybník a ohybnice. Tváření je zajištěno posouváním ohybnice směrem k ohybníku, přičemž celý proces trvá asi půl minuty.

- $S_1$  – Veličiny popisující geometrii a topologii

Přípojnice jsou vyráběny ze 7 mm tlustých hliníkových plechů. Tyto plechy jsou dodávány v pásech dlouhých 3 m a poté nastříhány na požadovanou délku. Šířka pásů je různá podle velikosti proudu, který má přípojnice přenášet. Podélné hrany jsou zaobleny s rádiusem 2 mm. Povrch plechu je galvanicky cínován pro zlepšení elektrických vlastností.

Ohybník a ohybnice mají poloměr 10 mm a úhel 55°. Šířka mezery v ohybnici je 45 mm a zaoblení jejích hran je realizováno rádiusem 4 mm.

- $S_2$  – Veličiny popisující vazby a interakce entity s okolím

Zařízení pro ohýbání je kotveno v podlaze pro zamezení posuvu způsobeného vibracemi. Při samotném procesu ohýbání se dostává do kontaktu ohybník a ohybnice s plochami plechu.

- $S_3$  – Veličiny popisující aktivaci entity s okolím

Proces ohýbání je spuštěn obsluhou zařízení. Ohýbačka je vybavena digitálním displejem a nastavování parametrů je velice přehledné. Po zadání požadované velikosti a rychlosti posuvu je proces spuštěn.

- $S_4$  – Veličiny popisující ovlivňování entity okolím

Tvorbu trhlin při ohýbání může ovlivňovat mnoho faktorů. Mezi nejpravděpodobnější patří špatná volba poloměru ohybu vzhledem k tloušťce plechu. Dalšími pak může být rychlost ohýbání, tření mezi kontaktními plochami nebo kvalita materiálu.

- $S_5$  – Veličiny popisující oborové vlastnosti struktury entity

Materiál tvářeného plechu je přesně definován poskytnutou tahovou zkouškou. Po volbě modelu materiálu tak mohou být všechny potřebné parametry spočítány.

- S6 – Veličiny popisující procesy a stavy

Podstatou ohýbání je vyvolání plastické deformace. Napětí v místě ohybu proto musí překročit mez kluzu. Aby však nedocházelo k nežádoucí tvorbě trhlin, nesmí být překročena určitá hranice deformace. Aktuální situace, kterou je potřeba řešit, ukazuje na to, že došlo k meznímu stavu souvisejícímu s porušováním soudržnosti tělesa.

- S7 – Veličiny popisující projevy entity

Při ohýbání dochází k rozsáhlým plastickým deformacím. Současný stav se projevuje tvorbou trhlin, což je nežádoucí a je potřeba řešit.

- S8 – Veličiny popisující důsledky projevů

Důsledkem vzniku trhlin je zmenšení celkového průřezu vodiče a ten by pak nesplňoval parametry garantované výrobcem. Po namontování by se vlivem pnutí mohla trhlinka dále dostat do fáze růstu a dojít přitom k úplnému dolomení vodiče.

## 6. VOLBA METODY ŘEŠENÍ

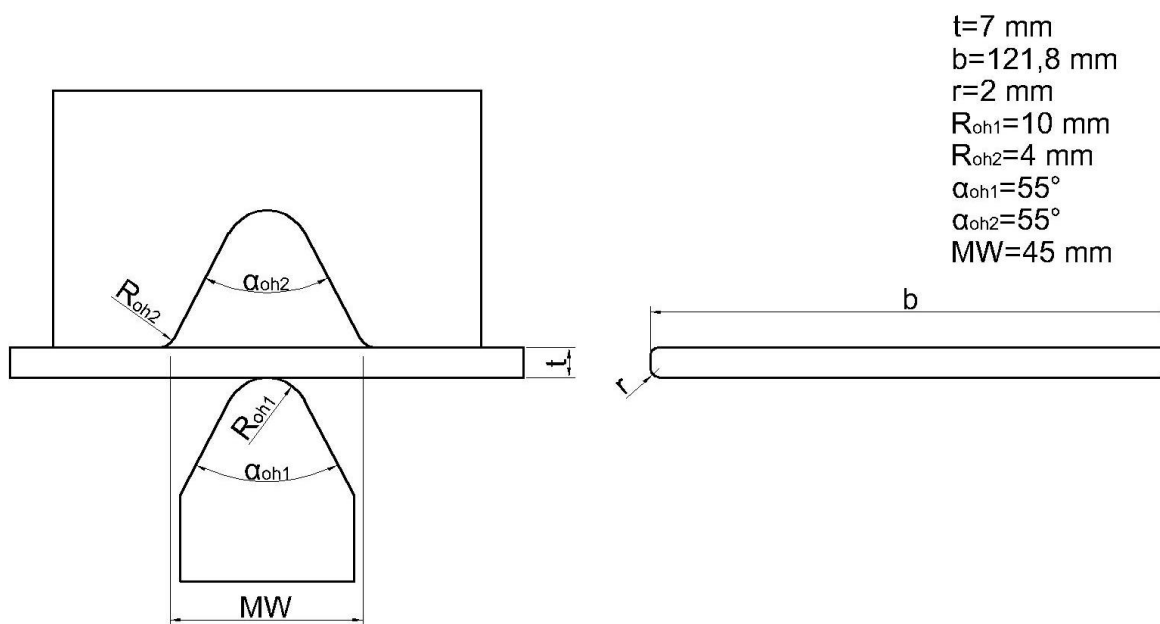
Nad volbou metody řešení nebylo třeba dlouho rozmýšlet. Zadavatelem bylo jasně řečeno, že k řešení má být využito vedle běžně používaných analytických a empirických vztahů numerický přístup pomocí metody konečných prvků.

V 8. kapitole budou použity vztahy z kapitoly 4.2.5., díky kterým lze určit minimální poloměr ohybu, aby nedošlo k porušení. Tato hodnota pak bude porovnána s poloměrem, který nastal při ohybu a provedeno zhodnocení, zda by mělo, či nemělo dojít k porušení.

V 9. kapitole bude úloha řešena výpočtovým modelováním pomocí metody konečných prvků. K tvorbě geometrie, sítě konečných prvků i samotným výpočtům bude využit software Salome-Meca. Tento software je volně šiřitelný, takže splňuje požadavky zadavatele. Úloha bude řešena nejprve ve 2D a poté pro zahrnutí přesného tvaru i ve 3D. Pro vyhodnocení zda k porušení došlo, či ne bude použito kritérium redukovaného plastického přetvoření, jelikož k němu stačí data pouze z jedné tahové zkoušky.

## 7. VSTUPNÍ PARAMETRY

- Materiálové parametry  
Níže uvedené materiálové parametry byly určeny z tahových zkoušek poskytnutých zadavatelem.
  - Modul pružnosti v tahu  $E$  [MPa]
  - Mez kluzu  $R_e$  [MPa]
  - Křivka zpevnění (flow curve)
  - Tažnost  $A$  [%]
- Geometrické parametry pro plech AL 1600A
  - Tloušťka plechu  $t$  [mm]
  - Šířka plechu  $b$  [mm]
  - Poloměr zaoblení hran plechu  $r$  [mm]
  - Poloměr ohybníku  $R_{oh1}$  [mm]
  - Vstupní zaoblení ohybnice  $R_{oh2}$  [mm]
  - Úhel ohybníku  $\alpha_{oh1}$  [°]
  - Úhel ohybnice  $\alpha_{oh2}$  [°]
  - Vstupní šířka ohybnice MW [mm]
  - Posuv ohybníku [mm]



Obr. 7.1 Schéma geometrie

## 8. ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ

V této kapitole bude ověřeno, zda současný stav splňuje podmínky pro vytvoření ohybu bez porušení na vnější straně ohybu. K tomu bude využita rovnice 4.13 odvozena v kapitole 4.2.5., která říká, že k porušení krajních vláken na vnější straně ohybu dojde při překročení minimálního poloměru ohybu.

Při dosazení tloušťky plechu  $t = 7 \text{ mm}$  a mezního přetvoření  $\varepsilon_c = 0,17$  odpovídajícího tažnosti  $A = 17\%$  dostaneme minimální poloměr vnějšího ohybu  $R_{1min}$ :

$$R_{1min} = \frac{t}{2} \left( \frac{1}{\varepsilon_c} + 1 \right) = \frac{7}{2} \left( \frac{1}{0,17} + 1 \right) = 24,09 \text{ mm}$$

Bez uvažování ztenčení průřezu by tomu pak odpovídal vnitřní poloměr ohybu

$$R_{0min} = R_{1min} - t = 24,09 - 7 = 17,09 \text{ mm}$$

Tento vztah však počítá s tím, že neutrální plocha se nachází v polovině tloušťky  $t$ . Abychom zohlednili tento faktor je nutné rovnici 4.13 lehce modifikovat s využitím vztahu 4.9.

$$\varepsilon_c = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{R_{1min}\alpha - \rho\alpha}{\rho\alpha} = \frac{R_{1min}\alpha - (R_{1min} - t + xt)\alpha}{(R_{1min} - t + xt)\alpha} \quad (8.1)$$

kde součinitel posunutí neutrální plochy  $x$  se určí z tabulky 4.1. Po vyjádření poloměru  $R_{1min}$  pak dostáváme:

$$R_{1min} = \frac{t - xt}{\varepsilon} + t - xt = \frac{7 - 0,45 \cdot 7}{0,17} + t - 0,45 \cdot 7 = 26,5 \text{ mm}$$

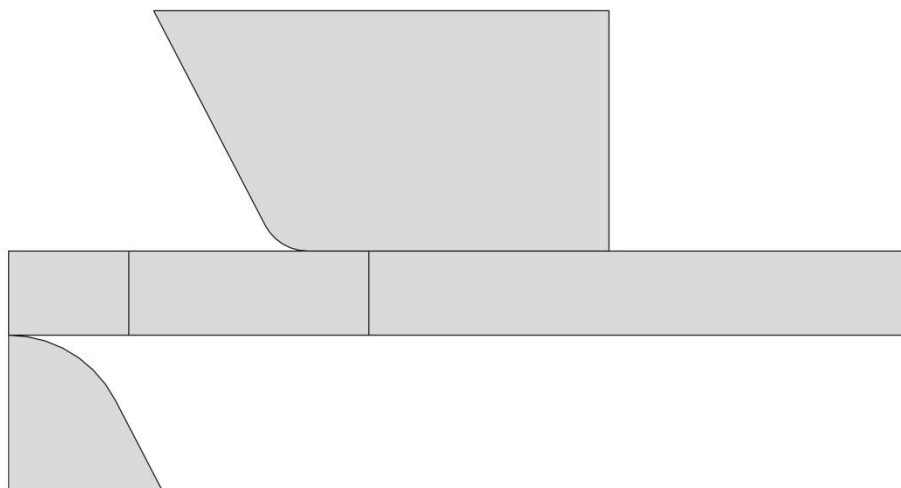
Pokud je skutečný vnější poloměr plechu po ohnutí  $R_{1sk} = 15 \text{ mm}$ , je jasné, že byla hranice minimálního poloměru překročena a proto došlo k porušení na vnější straně ohybu.

## 9. NUMERICKÝ PŘÍSTUP S VYUŽITÍM MKP

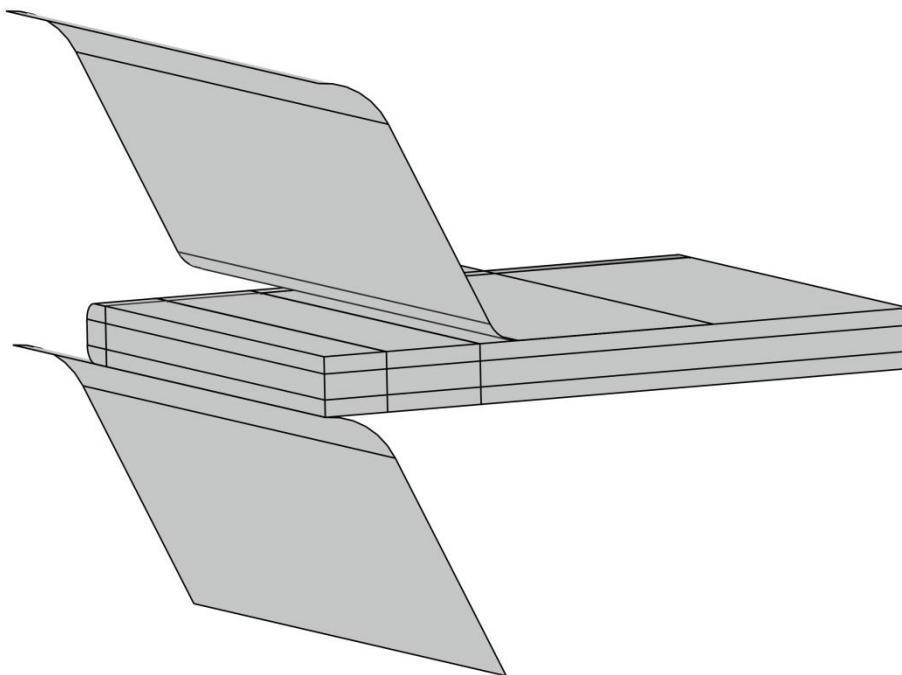
V nadcházejících podkapitolách bude popsán postup při vytváření numerické simulace v programovém prostředí Salome-Meca využívajícím metodu konečných prvků.

### 9.1. Geometrie

Geometrie byla vytvořena v modulu Geometry dle podkladů poskytnutých zadavatelem. Nejdříve byla úloha modelována jako 2D a poté pro zahrnutí dalších možných vlivů i jako 3D prostorová. Na obr. 9.1 a 9.2 jsou geometrie pro oba případy.

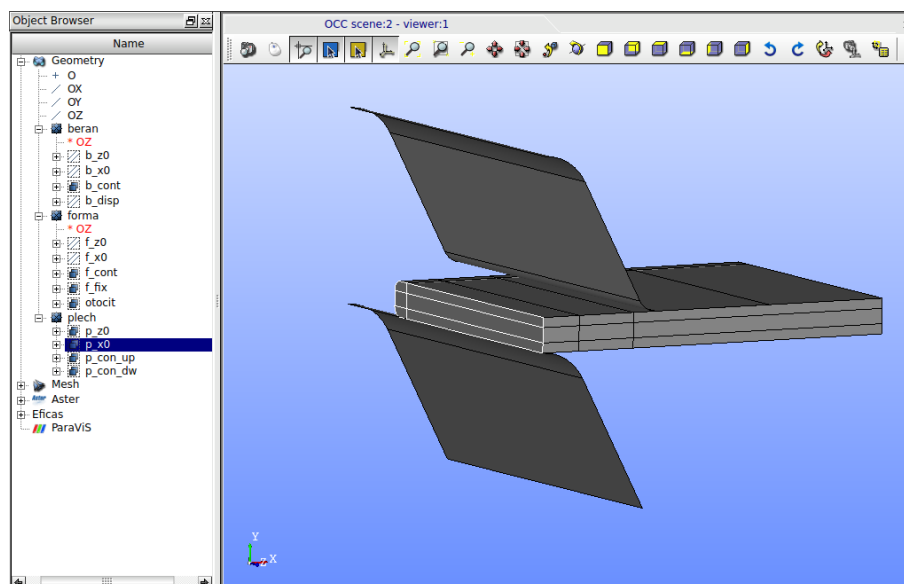


Obr. 9.1 2D geometrie



Obr. 9.2 3D geometrie

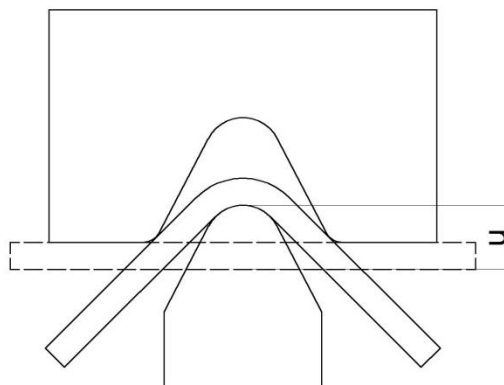
Příprava geometrie je v Salome-Meca velice důležitá. V dalších krocích, jako je vytváření sítě nebo aplikace okrajových podmínek, se totiž odkazujeme na objemy, plochy nebo hrany. Proto je vhodné si je správně rozdělit do skupin a přehledně pojmenovat. Skupiny čar a ploch pro aplikaci okrajových podmínek jsou na obr. 9.3.



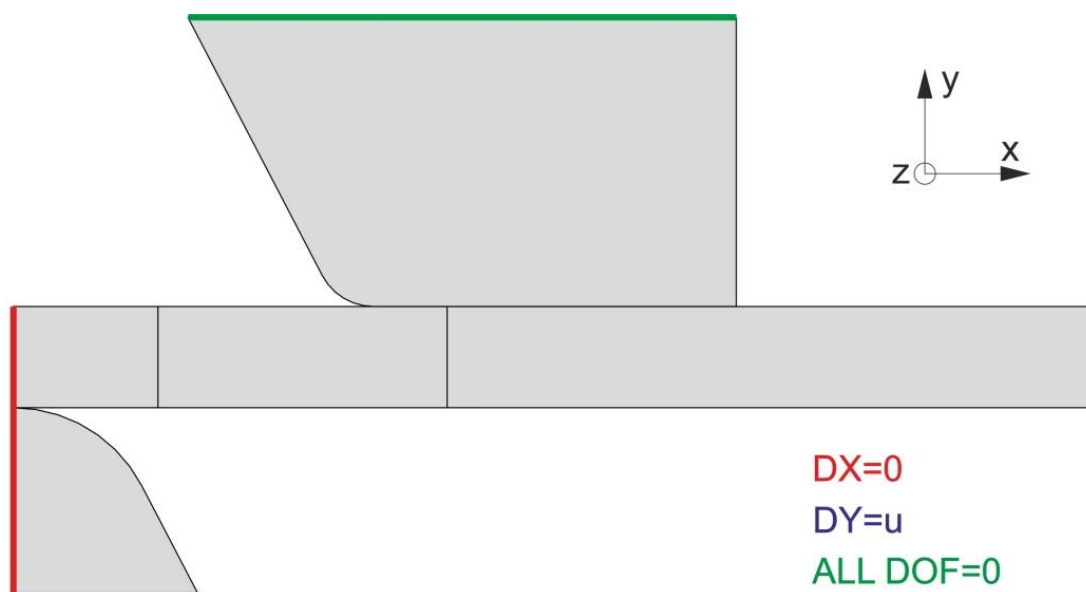
Obr. 9.3 Skupiny čar a ploch pro aplikaci OP

## 9.2. Okrajové podmínky

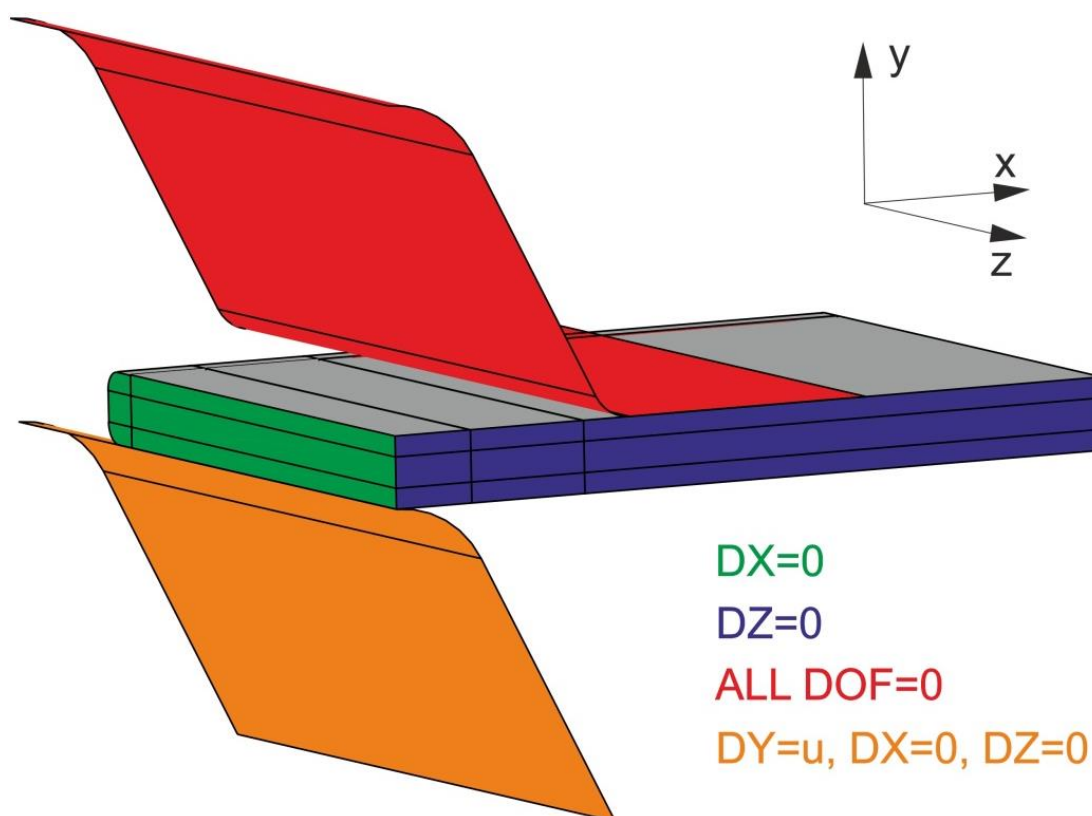
Jelikož jsme využili symetrie, byly podle toho také aplikovány okrajové podmínky. V případě 2D bylo zamezeno posuvu ve směru  $x$  na rovině symetrie. U 3D úlohy byl navíc předepsán nulový posuv ve směru  $z$ . U ohybnice byla horní plocha vetknuta. Ohybníku byl předepsán posuv  $u$  ve směru  $y$  o hodnotu určenou dle schématu na obr. 9.4. Tohle určení však nepočítalo s odpružením a zploštěním příčného průřezu. Proto byla tato hodnota pouze orientační a následnou simulací přesně určena tak, aby došlo k ohybu do  $90^\circ$ . Při simulacích nebylo uvažováno tření. Vliv tření (koeficient 0,2) byl zahrnut do porovnávací simulace v softwaru Ansys a výsledky ukázaly, že hodnota přetvoření je menší než bez tření. Proto se tímto zanedbáním pohybujeme na nebezpečnější straně z hlediska překročení kritéria přetvoření a můžeme tak s větší jistotou říct, že by mělo k porušení dojít.



Obr. 9.4 Schéma odhadu posuvu ohybníku



Obr. 9.5 OP u 2D úlohy

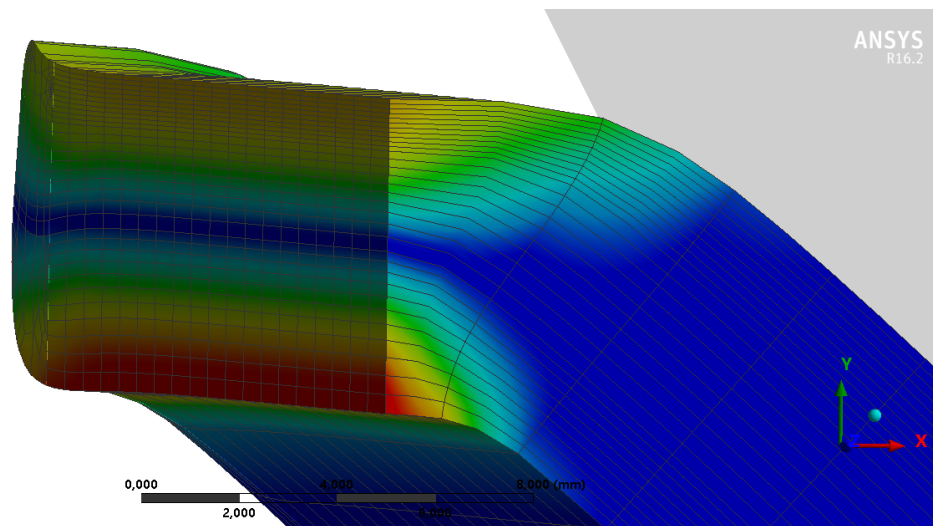
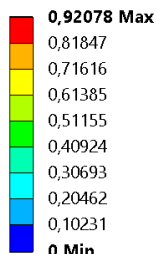


Obr. 9.6 OP u 3D úlohy

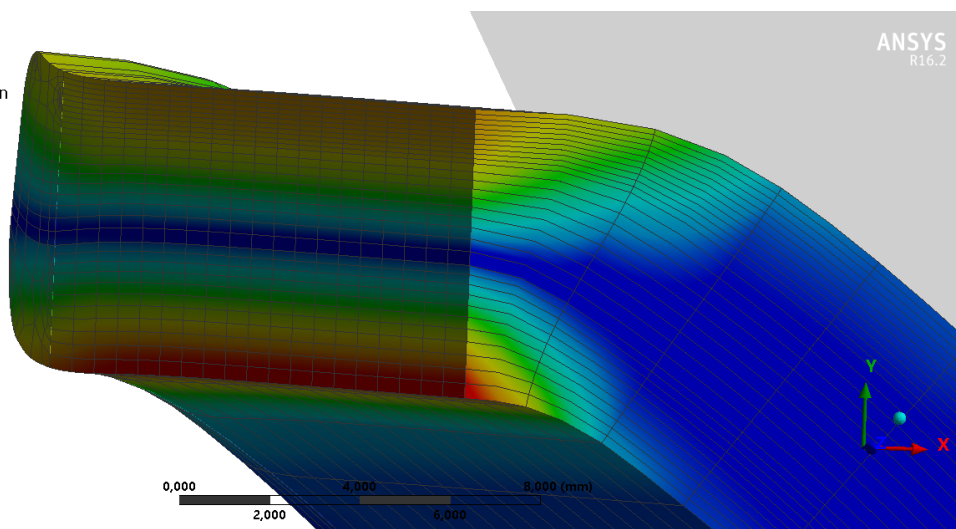
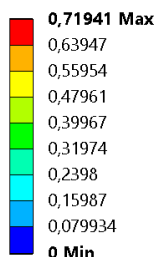


**B: Frictionless**

Equivalent Plastic Strain  
 Type: Equivalent Plastic Strain  
 Unit: mm/mm  
 Time: 2  
 12.05.2017 22:44

**C: Frictional**

Equivalent Plastic Strain  
 Type: Equivalent Plastic Strain  
 Unit: mm/mm  
 Time: 2  
 12.05.2017 22:52



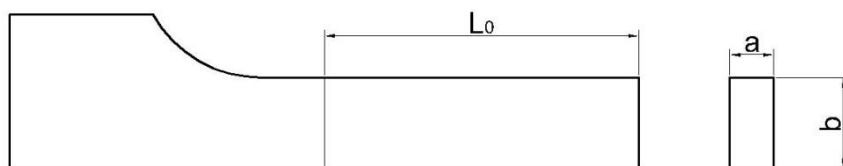
Obr. 9.7 Porovnání přetvoření bez tření a se třením

### 9.3. Model materiálu

Model materiálu jakožto vstup do simulace bývá často nejproblematictější částí modelování. Ani v této úloze tomu není jinak. V případech, kdy se pohybujeme v oblasti plasticity, nám totiž nestačí běžné materiálové konstanty jako modul pružnosti a Poissonův poměr. Je potřeba určit jak se materiál chová za mezí pevnosti. Toto chování popisuje křivka zpevnění, neboli „flow curve“.

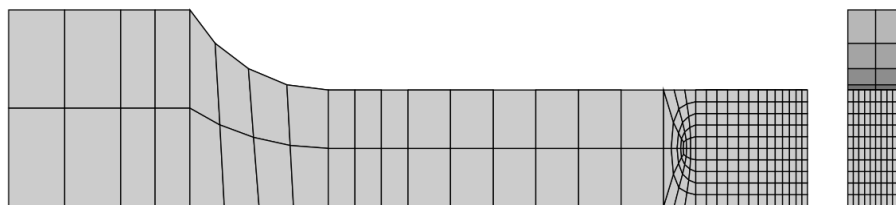
K určení této křivky je nutné nejdříve simulovat tahovou zkoušku, z které máme data. Z důvodu mnoha desítek simulací a následného zpracování dat byla tato simulace provedena v softwaru ANSYS. Data pak byla zpracována v softwaru Matlab. Převádění souborů ze Salome-Meca do Matlabu by bylo zdlouhavé a komplikované, jelikož neběží na stejném operačním systému. Byla tedy vytvořena geometrie vzorku, jehož rozměry jsou uvedeny v protokolech z experimentů. Jelikož nejde říct, že by se jednalo o rovinou deformaci nebo napjatost, byly použity 3D prostorové kvadratické prvky. Pro snížení výpočtové náročnosti bylo využito symetrie a stačilo tak modelovat pouze 1/8 zkušební vzorku.

$L_0 = 25 \text{ mm}$   
 $a = 3,5 \text{ mm}$   
 $b = 7,25 \text{ mm}$



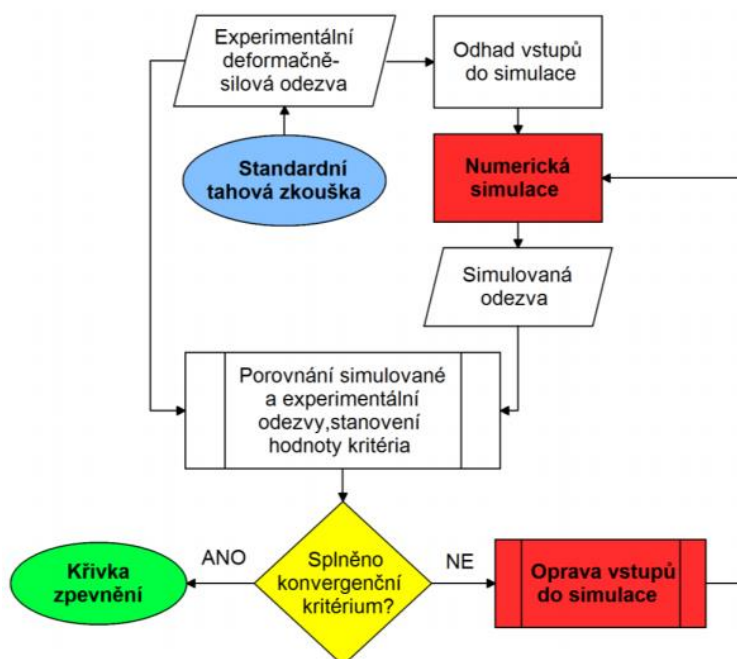
Obr. 9.8 Geometrie 1/8 zkušební vzorku

Na vzorku byla vytvořena mapovaná síť, zjemněna v místě tvorby krčku. S prvotním návrhem sítě, kde bylo 10 prvků po tloušťce, 10 prvků po šířce a délka prvku 0.35 mm, bylo provedeno odladění vstupní křivky.



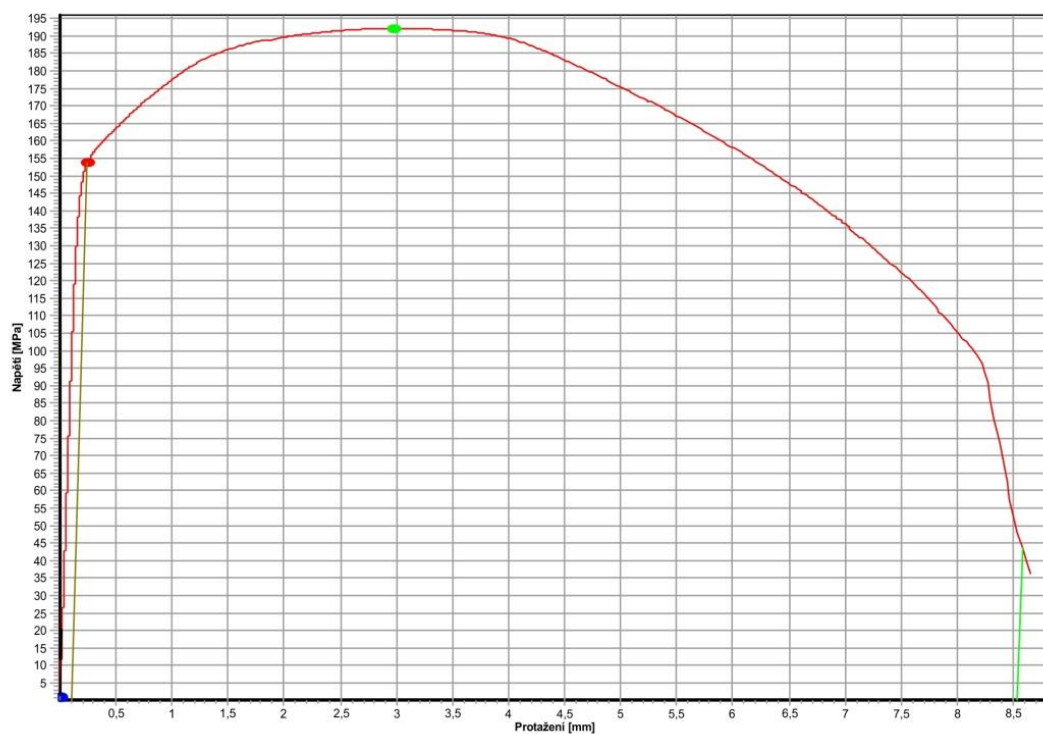
Obr. 9.9 Síť konečných prvků pro ladění flow curve

K určování křivky zpevnění existuje několik metod, viz. kapitola 4.3.1.. Já jsem se rozhodl použít iterační metodu, která optimalizuje chybu mezi experimentem a simulací. Diagram metody je zobrazen na obr. 9.10.

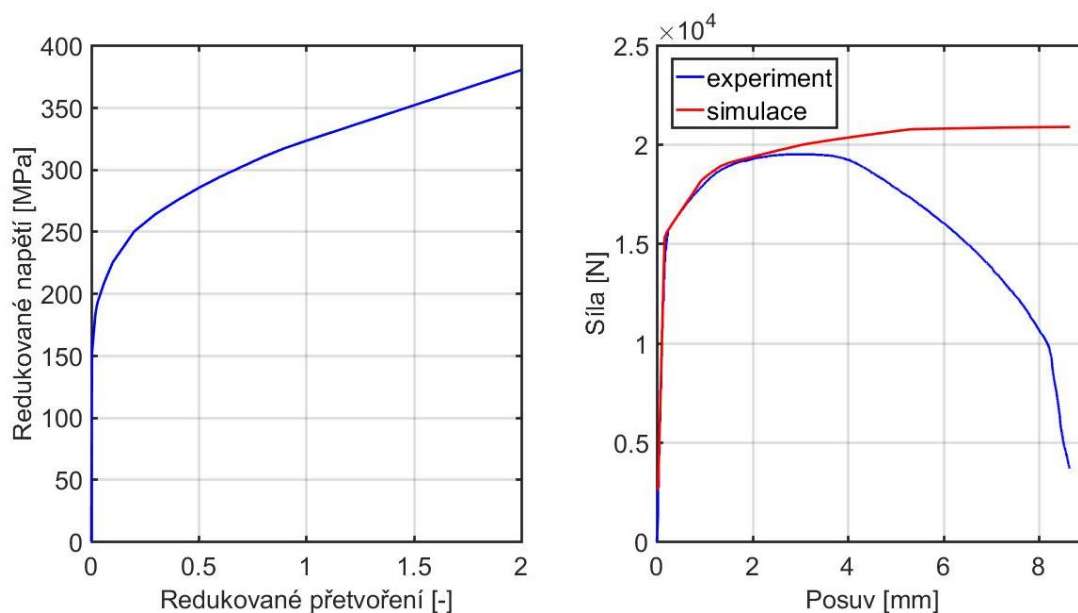


Obr. 9.10 Diagram postupu iterační metody [33]

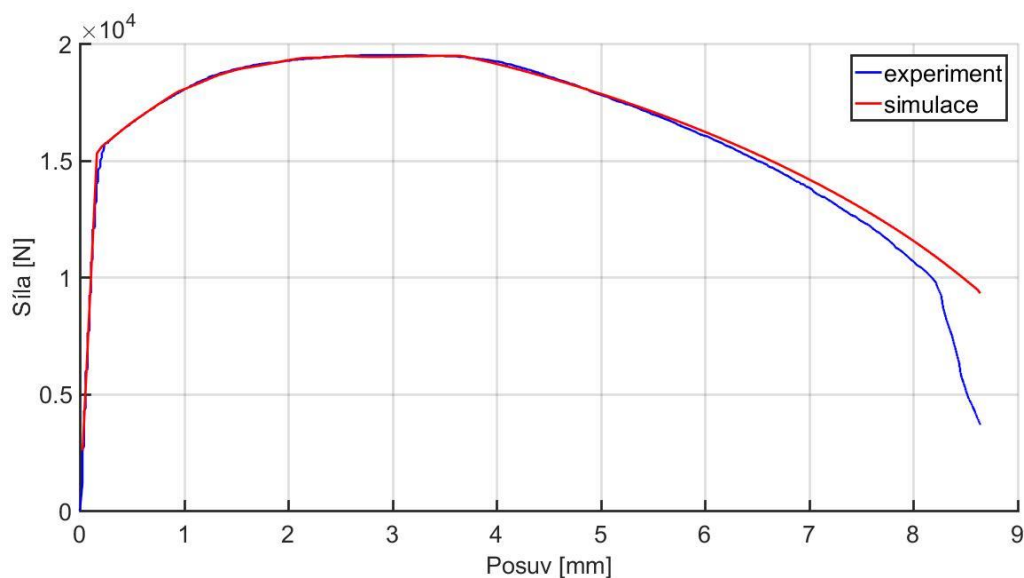
Metoda spočívá v nastřelení několika bodů křivky za mezí pevnosti. S tímto odhadem je pak provedena simulace tahové zkoušky a zpracována odezva síly na posuvu  $F - u$ . Tato odezva je pak porovnána s křivkou  $F - u$  získanou z experimentu. Nastřelené body jsou pak upravovány tak dlouho, dokud nedostaneme silovou odezvu s dostatečně malou chybou.



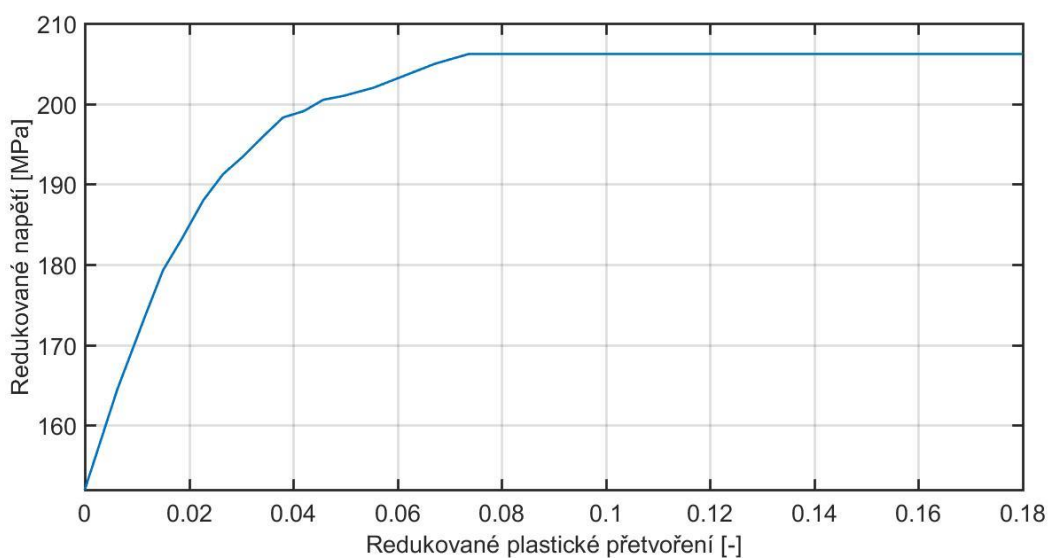
Obr. 9.11 Záznam tahové zkoušky



Obr. 9.12 Ladění křivky napětí-přetvoření podle silové odezvy



Obr. 9.13 Výsledná silová odezva

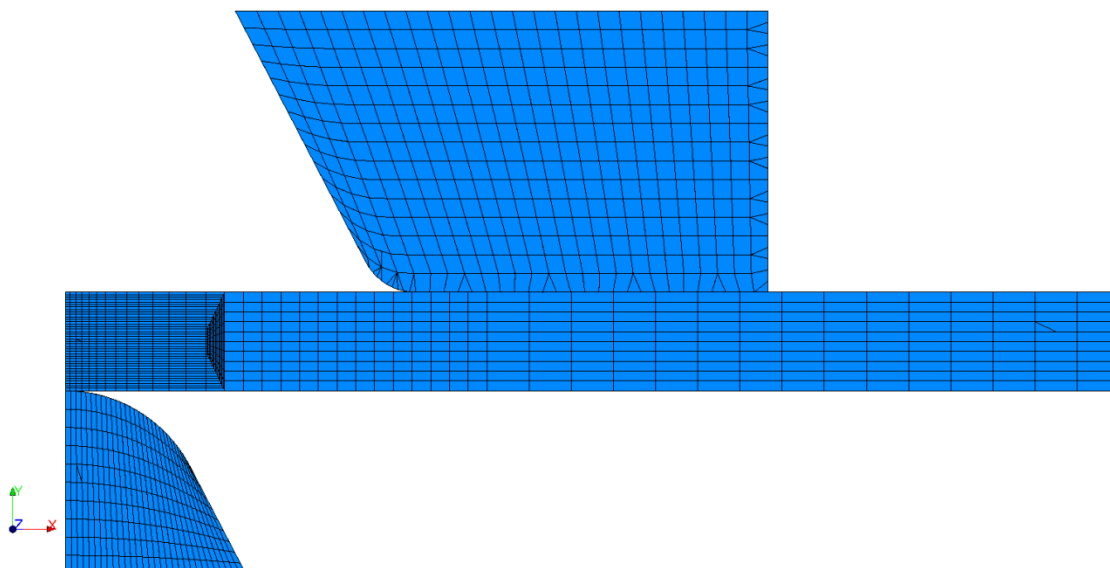


Obr. 9.14 Výsledná flow curve

Z výsledné křivky naladěné podle silové odezvy jde vidět, že k tomu aby bylo dosaženo co nejmenší chyby, bylo nutno sestrojit křivku bez zpevnění. Přestože je zde drobná odchylka, větší shody nebylo možno dosáhnout. Větší úhel klesání křivky z experimentu může být zaviněn tvorbou dutin, které při simulaci nejdou zahrnout. Pro určení zda se silová odezva nemění, byla síť zjemněna a odezva znovu vykreslena. Výsledkem byla naprosto stejná křivka.

### 9.4. Síť konečných prvků

Síť byla tvořena v modulu Mesh. Při dobře nachystané geometrii nebyl problém vytvořit mapovanou síť, zjemněnou v důležitých místech. U 2D úlohy byla vytvořena čtyřúhelníková síť s kvadratickými prvky.



Obr. 9.15 Síť pro 2D úlohu

Důležitou součástí tvorby sítě je provedení její konvergence. Bylo tedy provedeno několik simulací s různou velikostí prvků, konkrétně s velikostí hrany prvku po délce plechu:

$$a_1 = 0,35 \text{ mm}$$

$$a_2 = 0,2 \text{ mm}$$

$$a_3 = 0,12 \text{ mm}$$

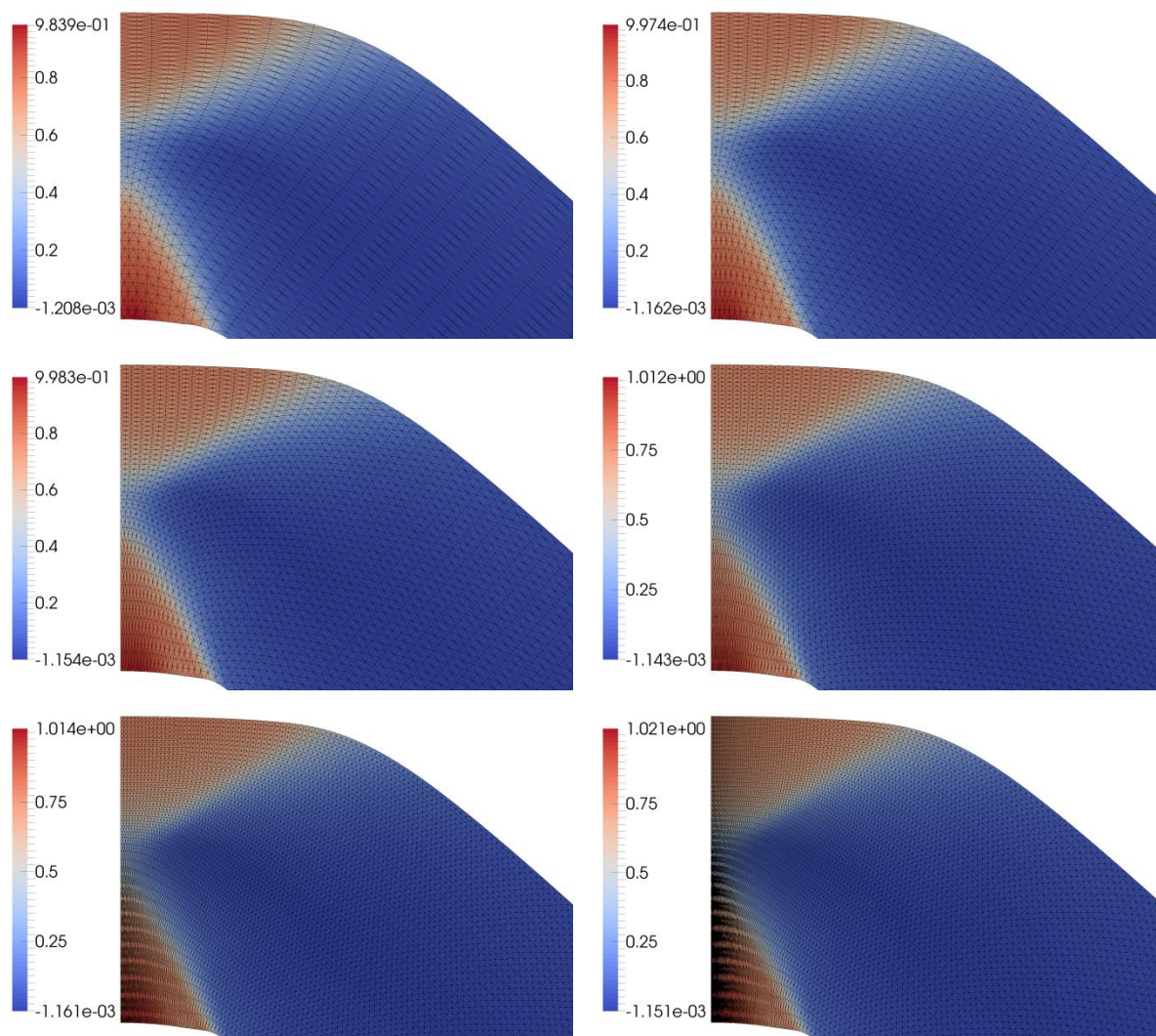
$$a_4 = 0,08 \text{ mm}$$

$$a_5 = 0,038 \text{ mm}$$

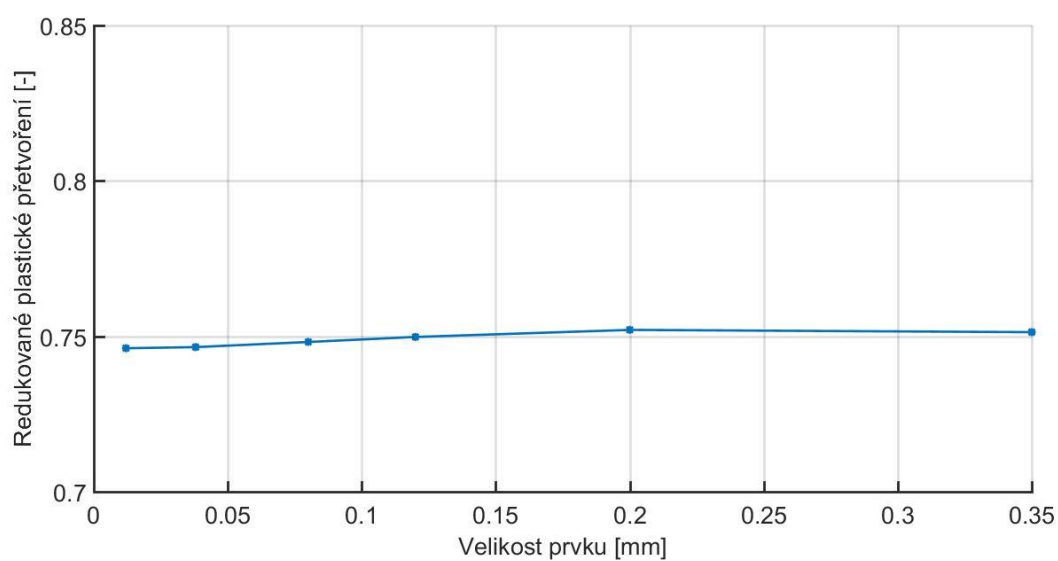
$$a_6 = 0,012 \text{ mm}$$

Velikost hrany prvku po tloušťce plechu neměla vliv na výsledky, a proto nebyla dále měněna. Konvergence sítě je zobrazena na obr. 9.16 a obr. 9.17.





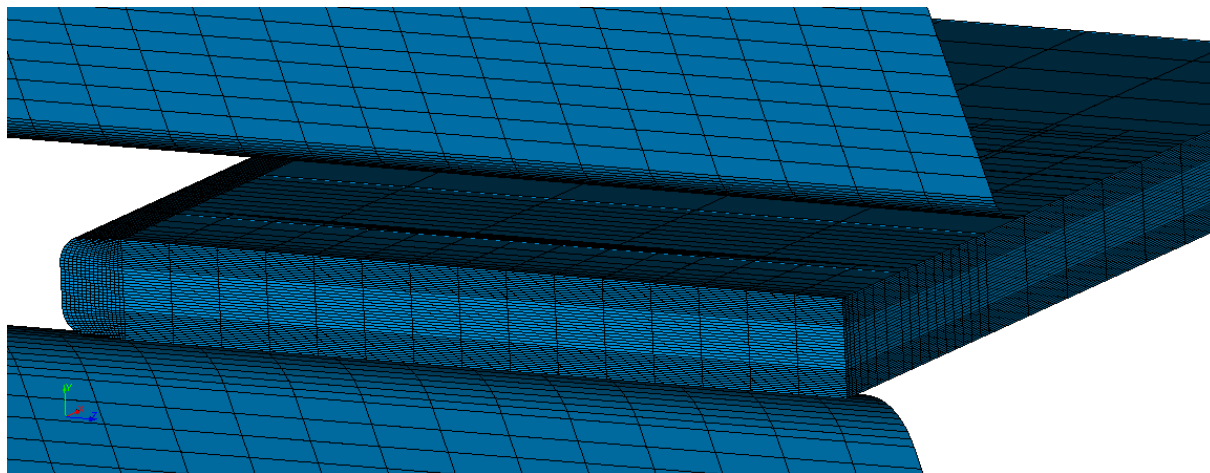
Obr. 9.16 Redukované plastické přetvoření pro různou velikost prvku pro 2D úlohu



Obr. 9.17 Graf konvergence sítě pro 2D úlohu

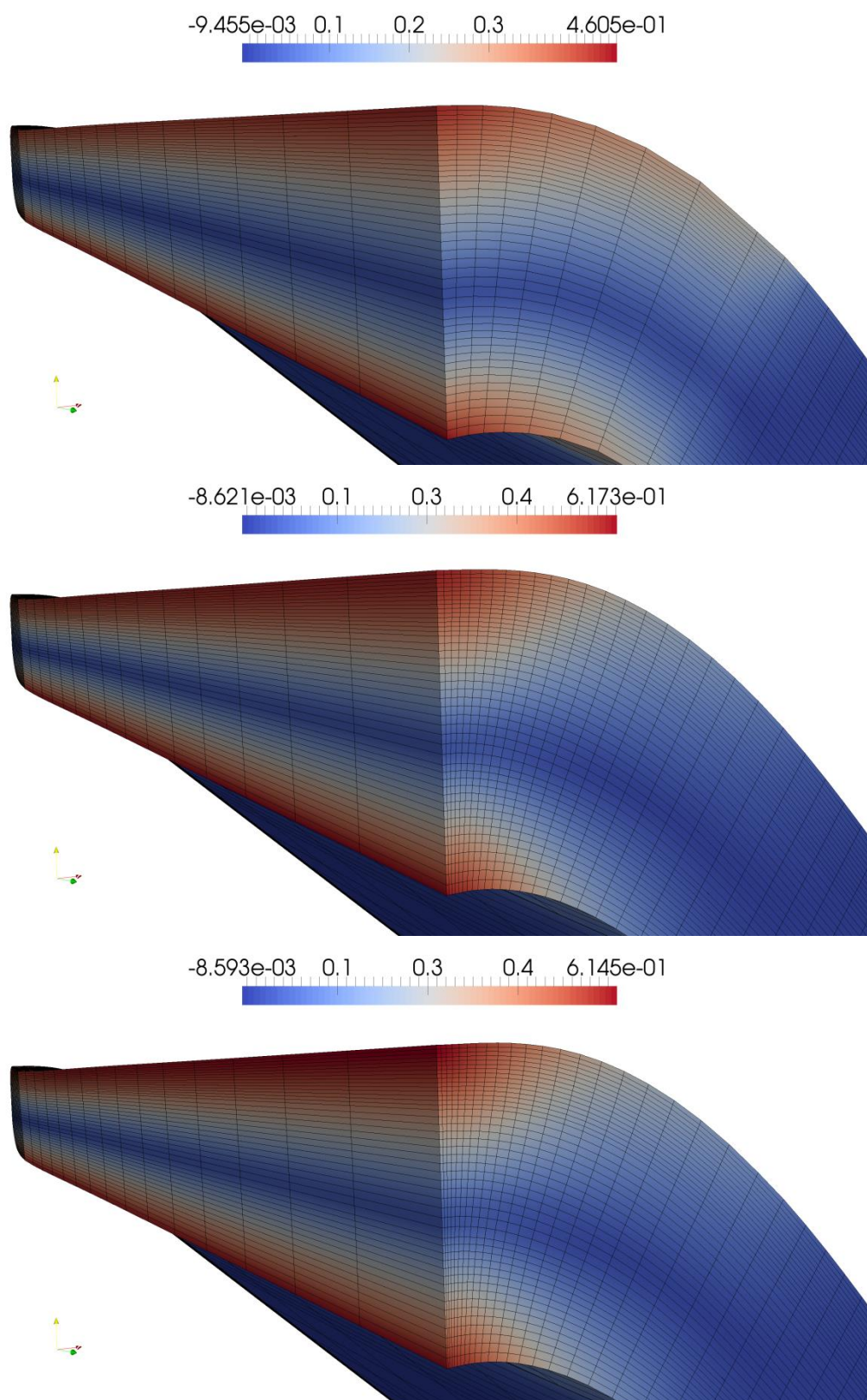
Přestože jde vidět se zmenšováním hrany prvku klesající tendence přetvoření, rozdíl všech výsledků je do 1% a proto není potřeba dále síť zjemňovat.

V 3D případě je síť tvořena hexaedry, avšak z důvodu velké hardwarové náročnosti byly použity pouze lineární prvky.



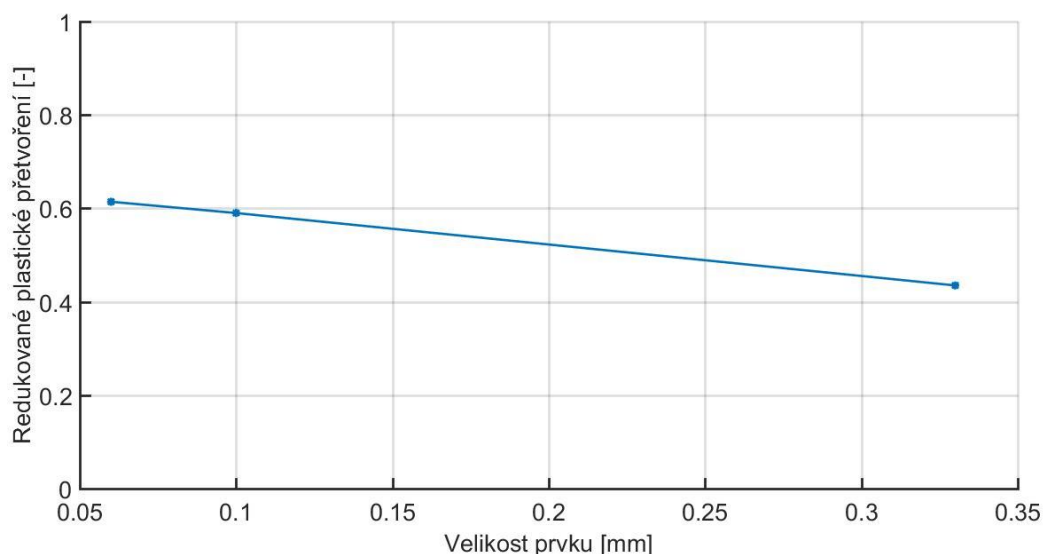
Obr. 9.18 Síť pro 3D úlohu

U 3D úlohy bylo postupováno stejně s tím rozdílem, že byla navíc prověřována různá velikost hrany prvku po šířce plechu. Výsledky ukázaly, že tento rozměr nemá na výsledky zásadní vliv.



Obr. 9.19 Redukované plastické přetvoření pro různou velikost prvku pro 3D úlohu





Obr. 9.20 Graf konvergence sítě pro 3D úlohu

### 9.5. Určení kritické hodnoty přetvoření

Jako kritérium pro vyhodnocení zda došlo k porušení bylo zvoleno kritérium redukovaného plastického přetvoření. Hodnotu kritického přetvoření jsme získali ze simulované tahové zkoušky. U této simulace je však velký problém s lokalizací deformace do jednoho místa. Jelikož materiál vůbec nezpevňuje, při tak velkých přetvořeních teče „jako bláto“. Tím pádem jsou výsledky mnohem více závislé na velikosti prvků, a proto se síť nepodařilo úspěšně zkonvergovat. Konvergence probíhala analyzováním závislosti každého rozměru prvku, tedy šířky, délky a výšky.

U šířky a výšky byla velikost prvku řízena počtem prvků. Postupně byla zkoušena síť s počtem prvků  $n_{1-5}$  na dané hraně vzorku. Výsledky a závislosti jsou zobrazeny na obr. 9.21-9.24.

$$n_1 = 10$$

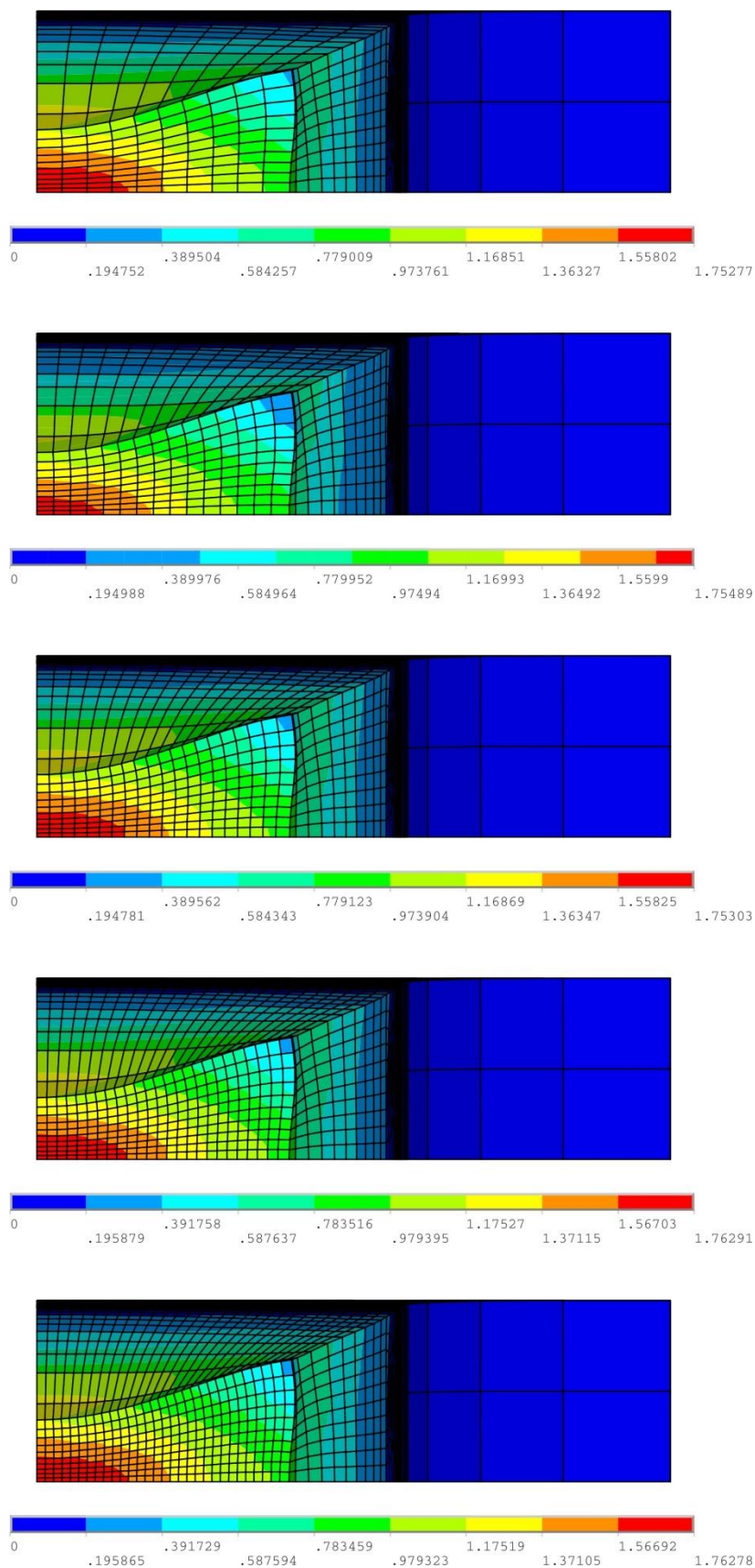
$$n_2 = 15$$

$$n_3 = 20$$

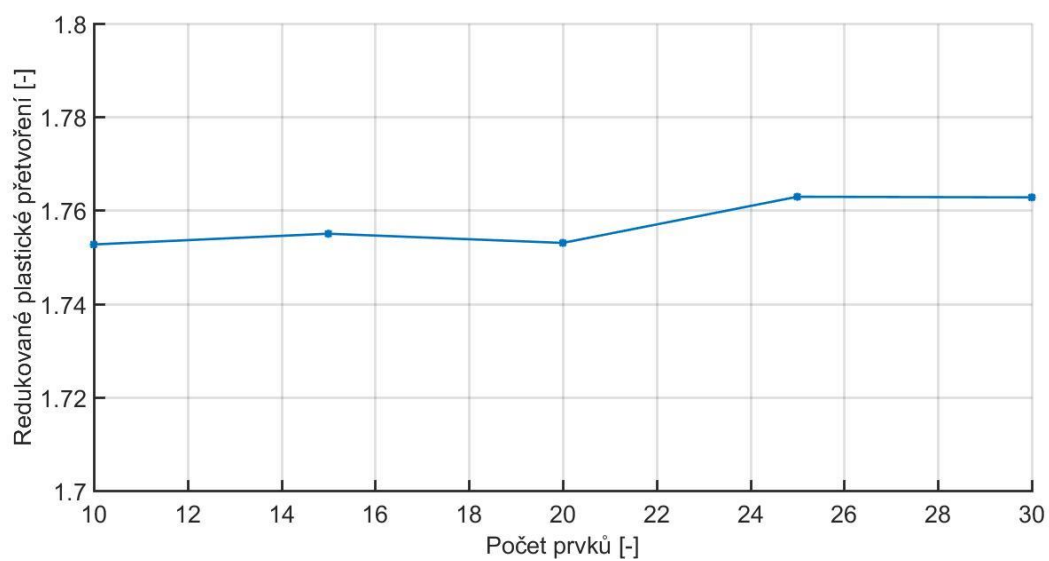
$$n_4 = 25$$

$$n_5 = 30$$

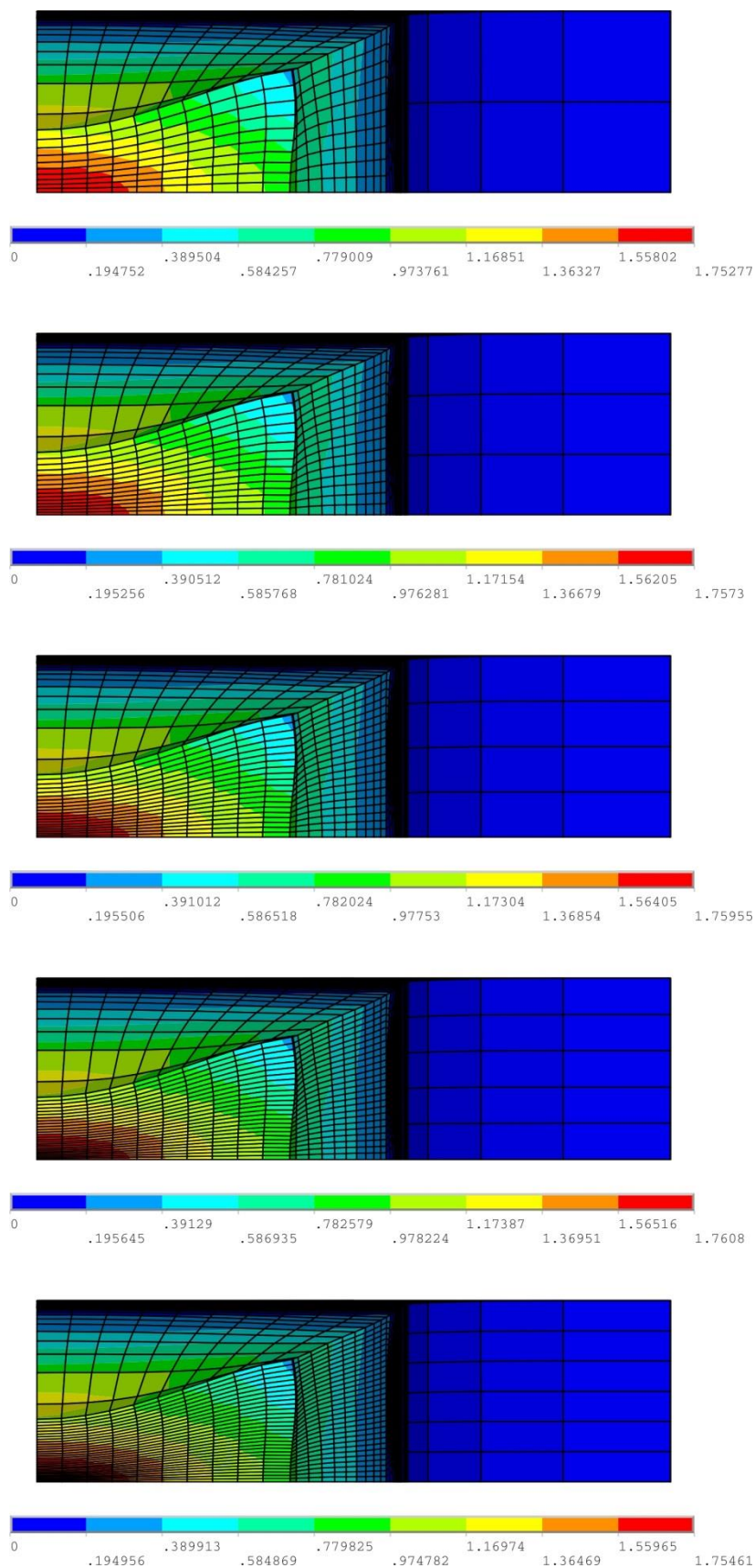
Délka prvku pak byla zkoušena taková, aby odpovídala délce prvku ze simulace ohýbání z kap. 9.4. ( $a_{1-6}$ ). Výsledky jsou znázorněny na obr. 9.25 a 9.26.



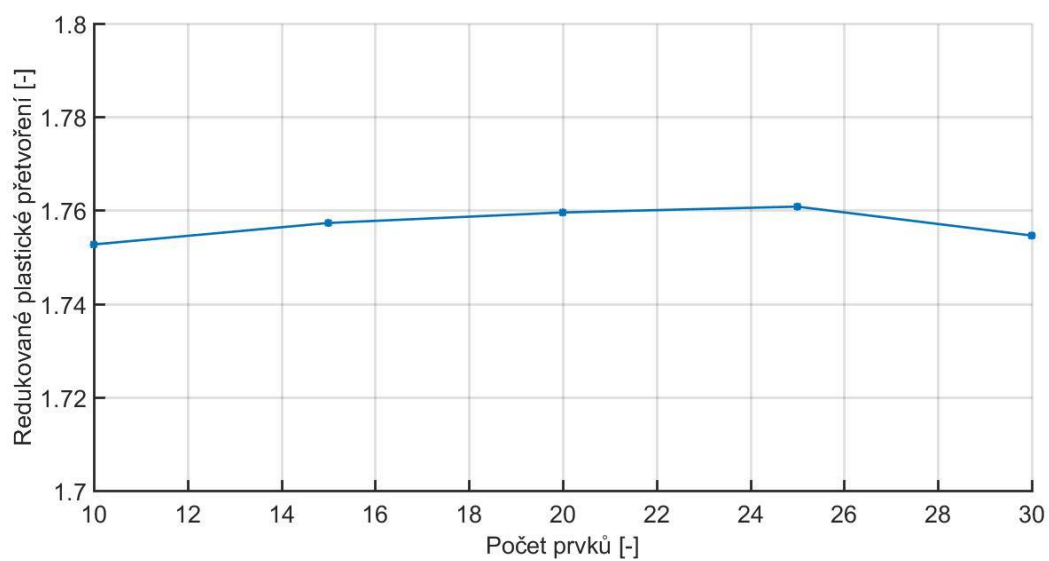
Obr. 9.21 Výsledky redukovaného plastického přetvoření při různé šířce prvku



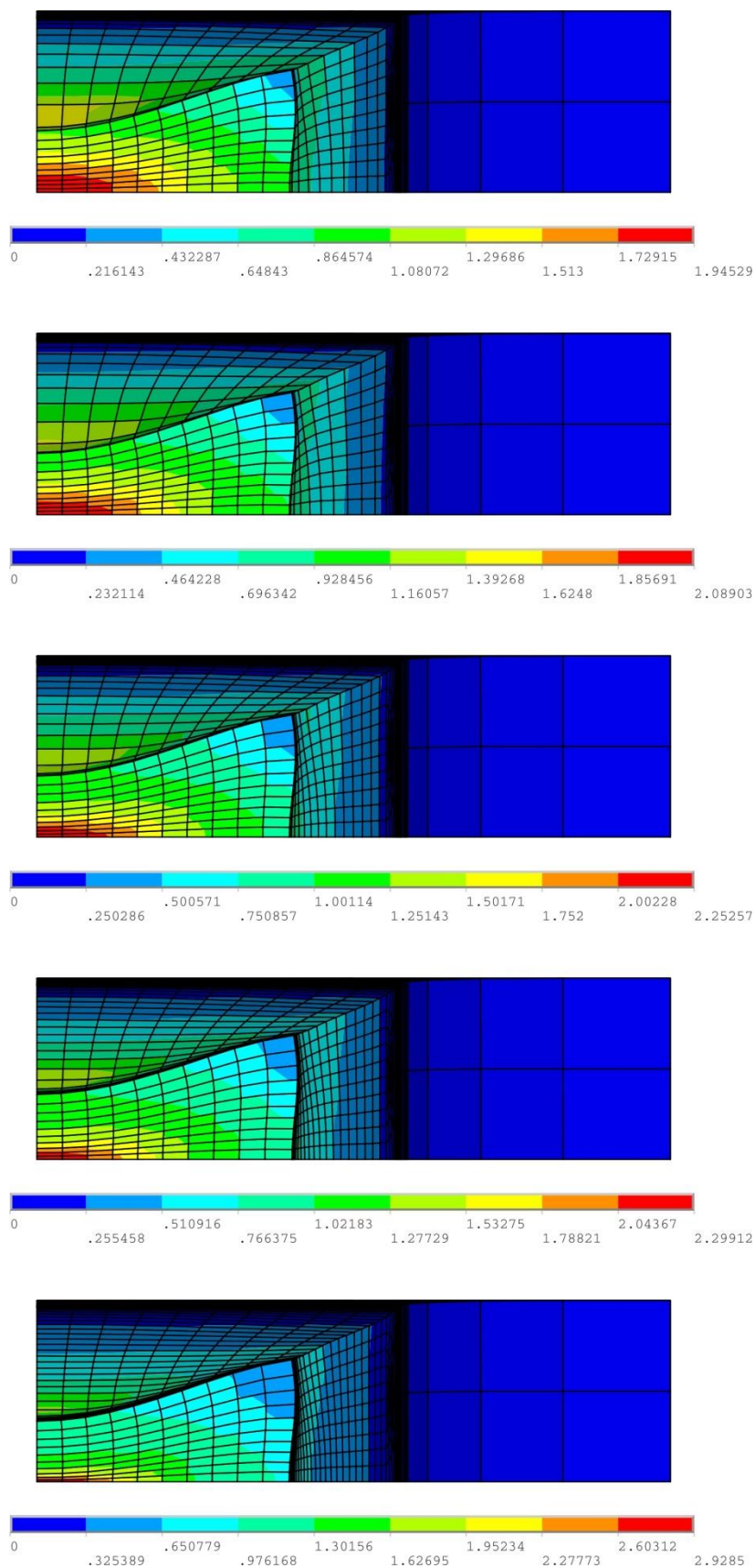
Obr. 9.22 Graf závislosti redukovaného plastického přetvoření na šířce prvku



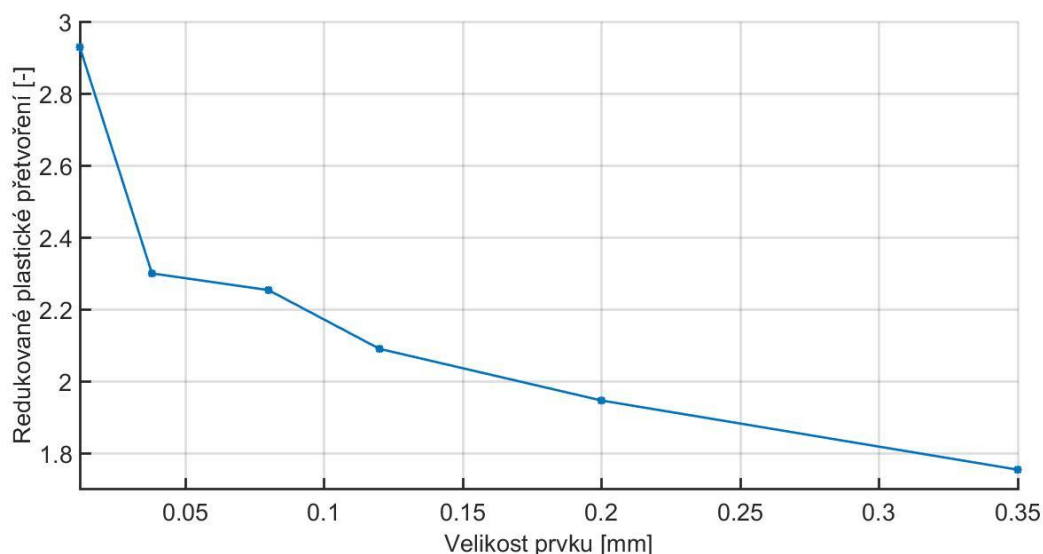
Obr. 9.23 Výsledky redukovaného plastického přetvoření při různé výšce prvku



Obr. 9.24 Graf závislosti redukovaného plastického přetvoření na výšce prvku



Obr. 9.25 Výsledky redukovaného plastického přetvoření při různé délce prvku



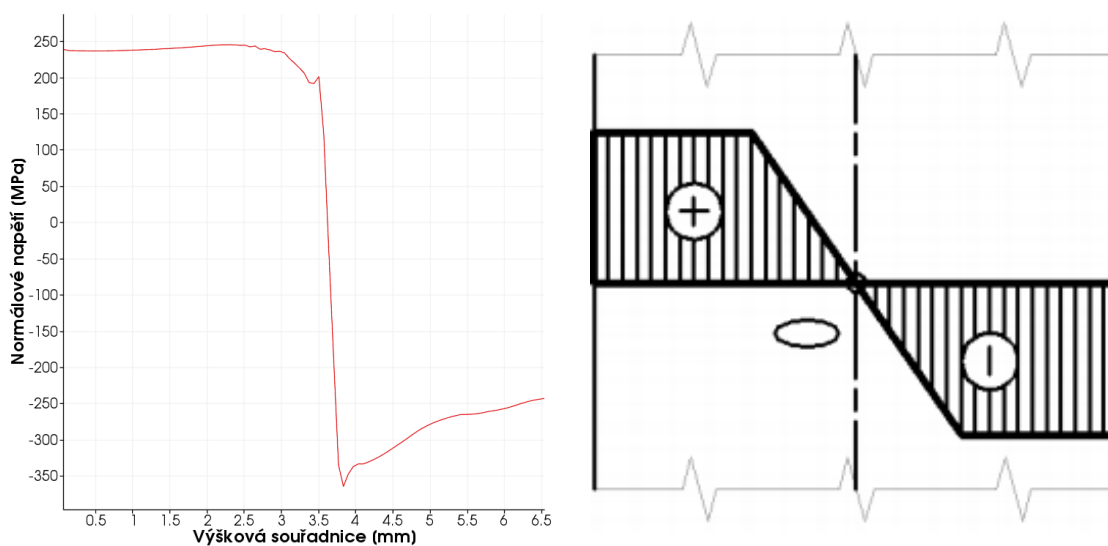
Obr. 9.26 Graf závislosti redukovaného plastického přetvoření na délce prvku

## 9.6. Vyhodnocení

V následujících podkapitolách bude provedena kontrola hodnot získaných ze simulací. Nejdříve budou srovnány průběhy napětí a přetvoření s modelovými průběhy a poté vyhodnoceno samotné porušení a to dvěma přístupy.

### 9.6.1. Průběh napětí a přetvoření

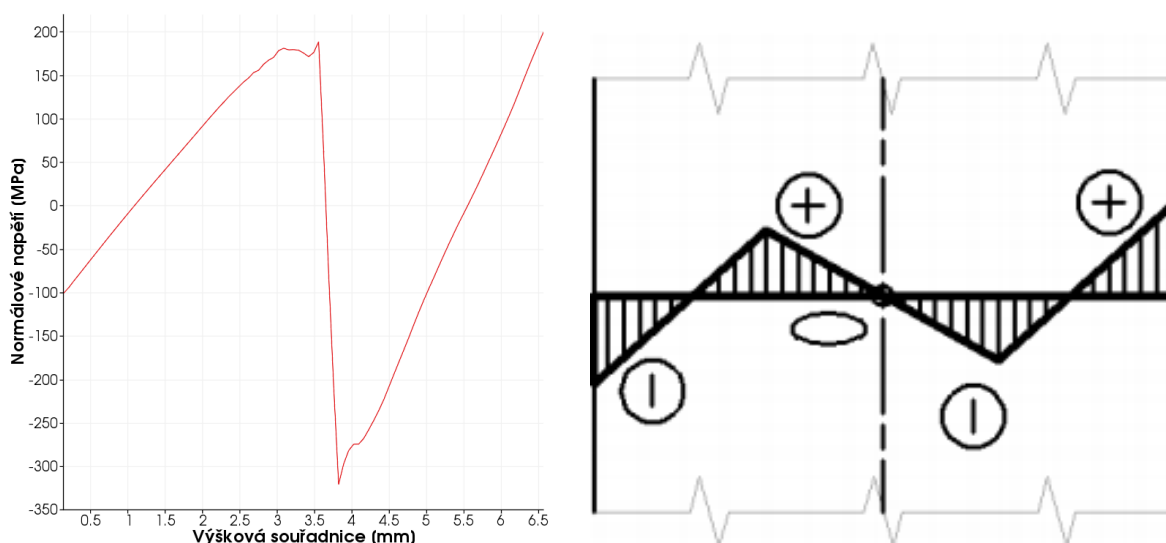
K první kontrole správnosti výsledků byly vykresleny průběhy napětí a přetvoření po průřezu ohybu. Jako první bylo porovnáváno normálové napětí v okamžiku maximálního ohybu s napětím na obr. 4.14 a). Jde vidět, že kromě vnitřní strany ohybu kde napětí klesá zřejmě vlivem zalomení, jsou průběhy velmi podobné.



Obr. 9.27 Srovnání průběhu normálového napětí po průřezu při maximálním ohybu

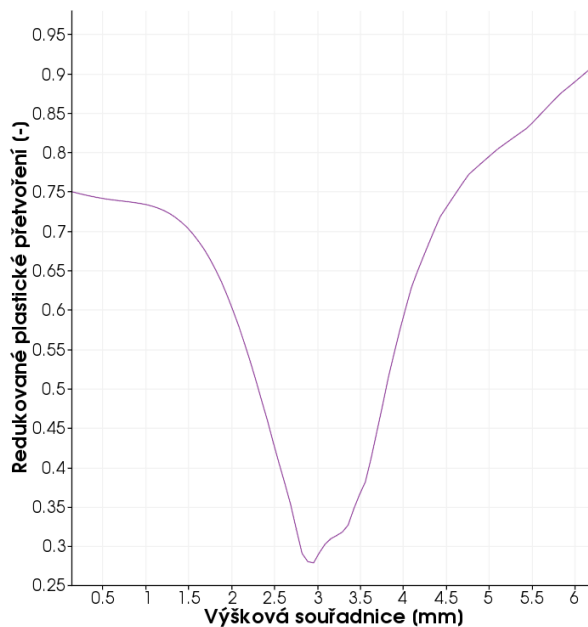


Po odlehčení dojde k přerozdělení napětí a jelikož byla překročena mez kluzu, zůstává v ohýbané součásti zbytkové napětí. Jeho průběh a srovnání s teoretickým průběhem je na obr. 9.28.



Obr. 9.28 Srovnání průběhu normálového napětí po průřezu po odlehčení

Přetvoření by mělo být největší v krajních vláknech a směrem ke středu klesat, což koresponduje s obr. 9.29.

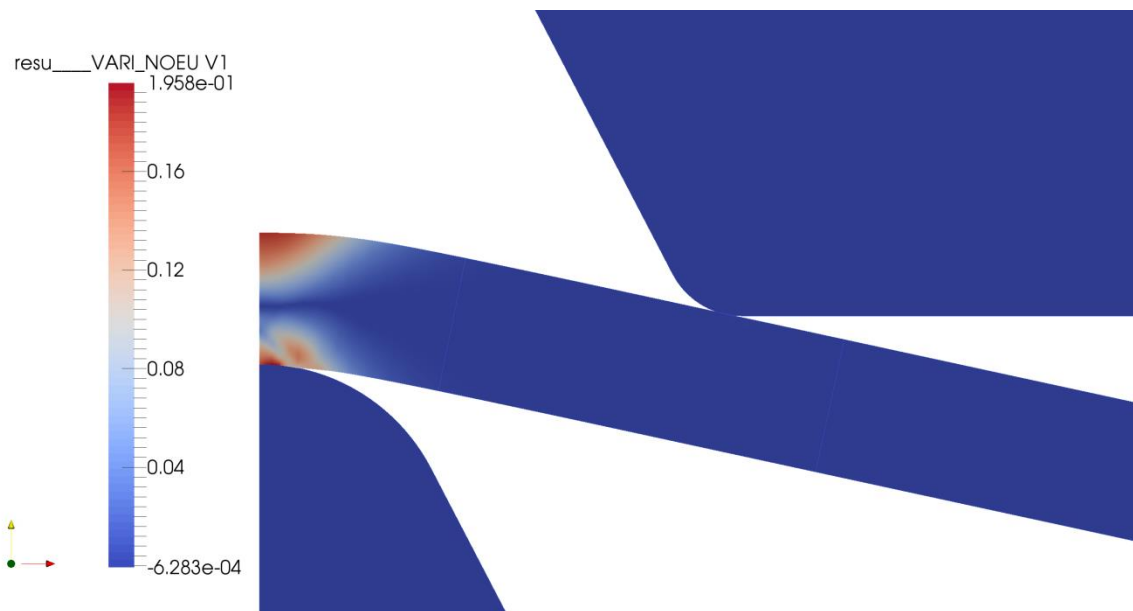


Obr. 9.29 Průběh redukovaného plastického přetvoření po průřezu



### 9.6.2. Kritérium tažnosti

Při vyhodnocování výsledků byly použity dva různé přístupy. Ten první, asi nejjednodušší možný říká, že k porušení dojde při překročení tažnosti materiálu. Pokud tedy z tahové zkoušky víme, že je tažnost 17 % (normálové přetvoření je 0,17), pak můžeme plech ohýbat do té doby, než dosáhneme této hranice. Výsledkem je ohyb dle obr. 9.30.

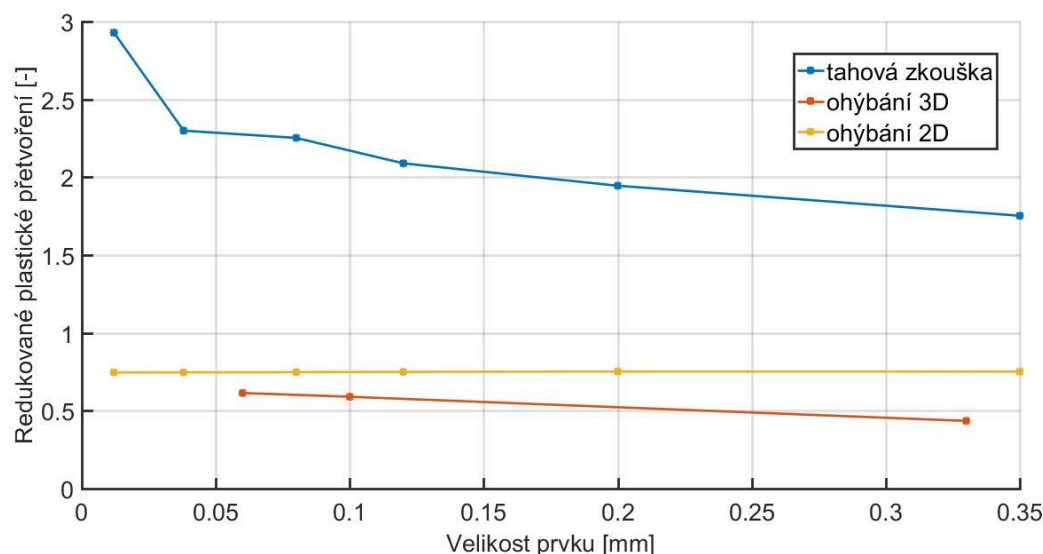


Obr. 9.30 Úhel ohybu při, kterém dojde k překročení tažnosti materiálu

Jde vidět, že při hodnotě přetvoření odpovídající tažnosti jde dosáhnout jen velmi malého ohybu. Tento přístup totiž nebere vůbec v úvahu lokalizaci přetvoření. Při tahové zkoušce dochází k rovnoměrné deformaci pouze do meze pevnosti. Za touto mezí už se nejedná o jednoosou napjatost a přetvoření se proto v různých místech liší. Z tahové zkoušky sice víme, že k porušení dojde při daném přetvoření, už ale nedokážeme určit jaké přetvoření nastalo v místě porušení (krčku).

### 9.6.3. Kritérium redukovaného plastického přetvoření

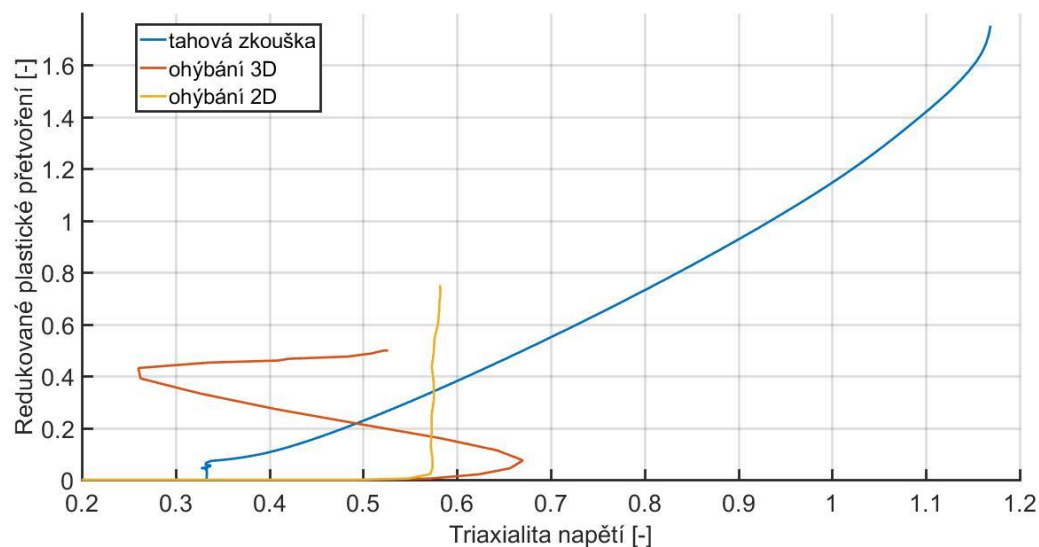
Druhý přístup, kterým bylo vyhodnocováno, zda k porušení dojde či ne, využívá výsledky ze simulované tahové zkoušky. Pokud všechny vstupní parametry simulace odpovídají experimentu, pak můžeme určit redukované plastické přetvoření, při kterém dojde k porušení. Z důvodu popsaného v kap. 9.5. se nepodařilo dosáhnout konečné hodnoty přetvoření. Dají se tak maximálně porovnat hodnoty přetvoření ze simulace ohýbání a tahové zkoušky při stejné velikosti prvku sítě. Jelikož bylo z grafů 9.22 a 9.24 dokázáno, že výsledky nejsou závislé na šířce a výšce prvku, byly srovnány výsledky s různou délkou prvku.



Obr. 9.31 Srovnání redukovaného plastického přetvoření kritického a získaného ze simulace ohýbání pro různou délku prvku

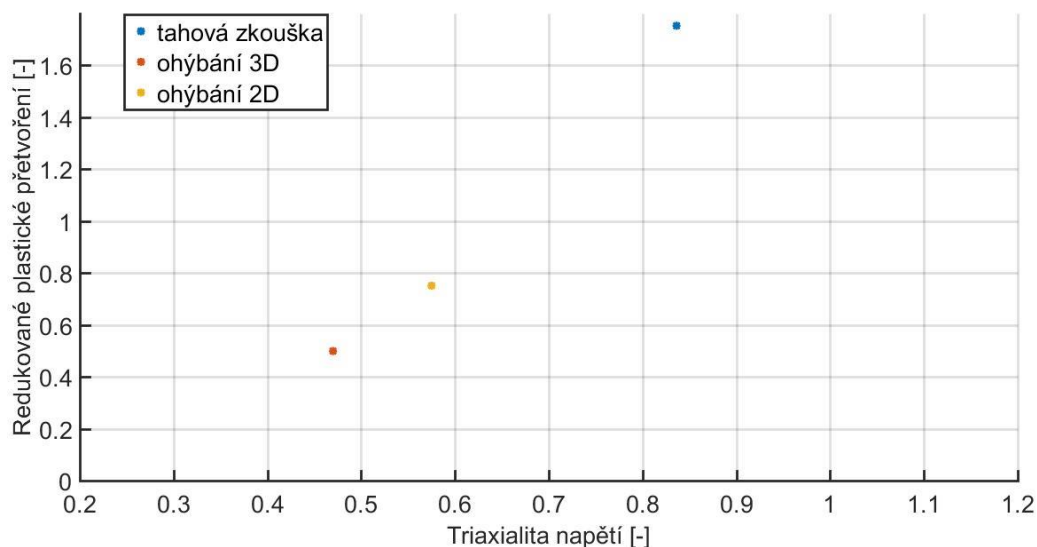
Z grafu jde vidět, že při jakkoliv jemné síti jsme stále pod kritickou hranicí. K porušení by tedy v žádném případě dojít nemělo.

Jak už ale bylo zmíněno v kap. 4.3.2., toto kritérium nezohledňuje vliv triaxiality. Přesně se dají porovnávat pouze výsledky z příkladů s podobnými napětovými stavy. K tomu aby mohla být přesně predikována křivka přetvoření v závislosti na triaxialitě by bylo potřeba mnoho experimentů. I s jednou tahovou zkouškou však můžeme ověřit v jakých hodnotách se zhruba pohybujeme a usoudit zda by k porušení mohlo dojít. Triaxialitu jsme vykreslili ze simulace tahové zkoušky s nejnižší hodnotou redukovaného plastického přetvoření. To je nejpravděpodobnější případ kdy by mohlo dojít k porušení. Průběh redukovaného plastického přetvoření na triaxialitě napětí je vykreslen na obr. 9.32.



Obr. 9.32 Srovnání průběhů triaxiality

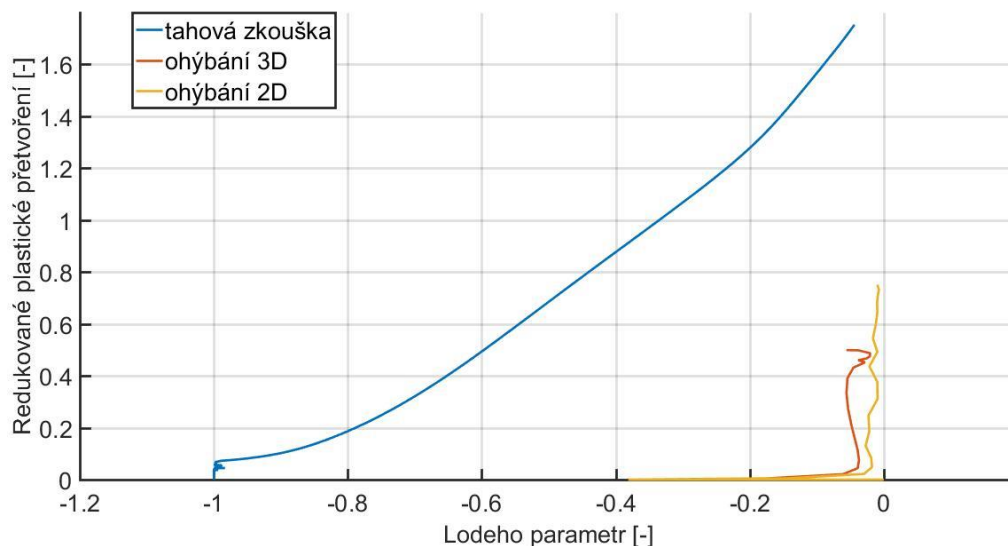
Z těchto průběhů určíme střední hodnoty pomocí rovnice 4.30 a zavedeme do grafu.



Obr. 9.33 Srovnání středních hodnot triaxiality

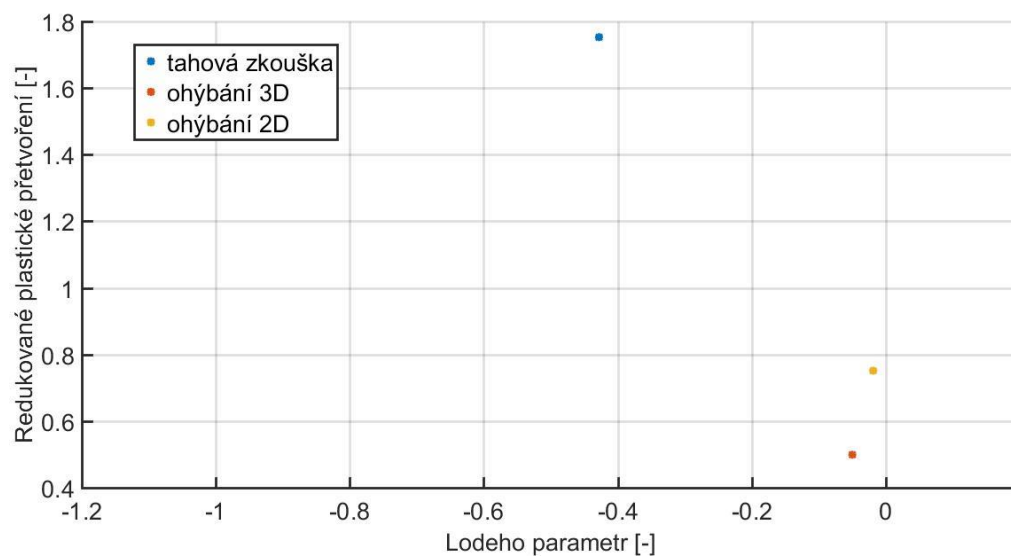
Přestože je kritérium reprezentováno pouze jedním bodem, díky obr. 4.19 z kap. 4.3. si lze představit průběh křivky, která by byla touto hodnotou proložena. Ověření pomocí triaxiality tedy potvrdilo, že by k porušení dojít nemělo.

V jistých případech však ani při stejné triaxialitě není možno přetvoření porovnávat. Jde o případy s různou hodnotou Lodeho úhlu (Lodeho parametru). Normalizovaný Lodeho úhel tvoří třetí rozměr grafu na obr. 4.20 a může posunout výsledky k úplně jiným hodnotám. Lodeho parametr se spočítá z rov. 4.32.



Obr. 9.34 Srovnání průběhů Lodeho parametru

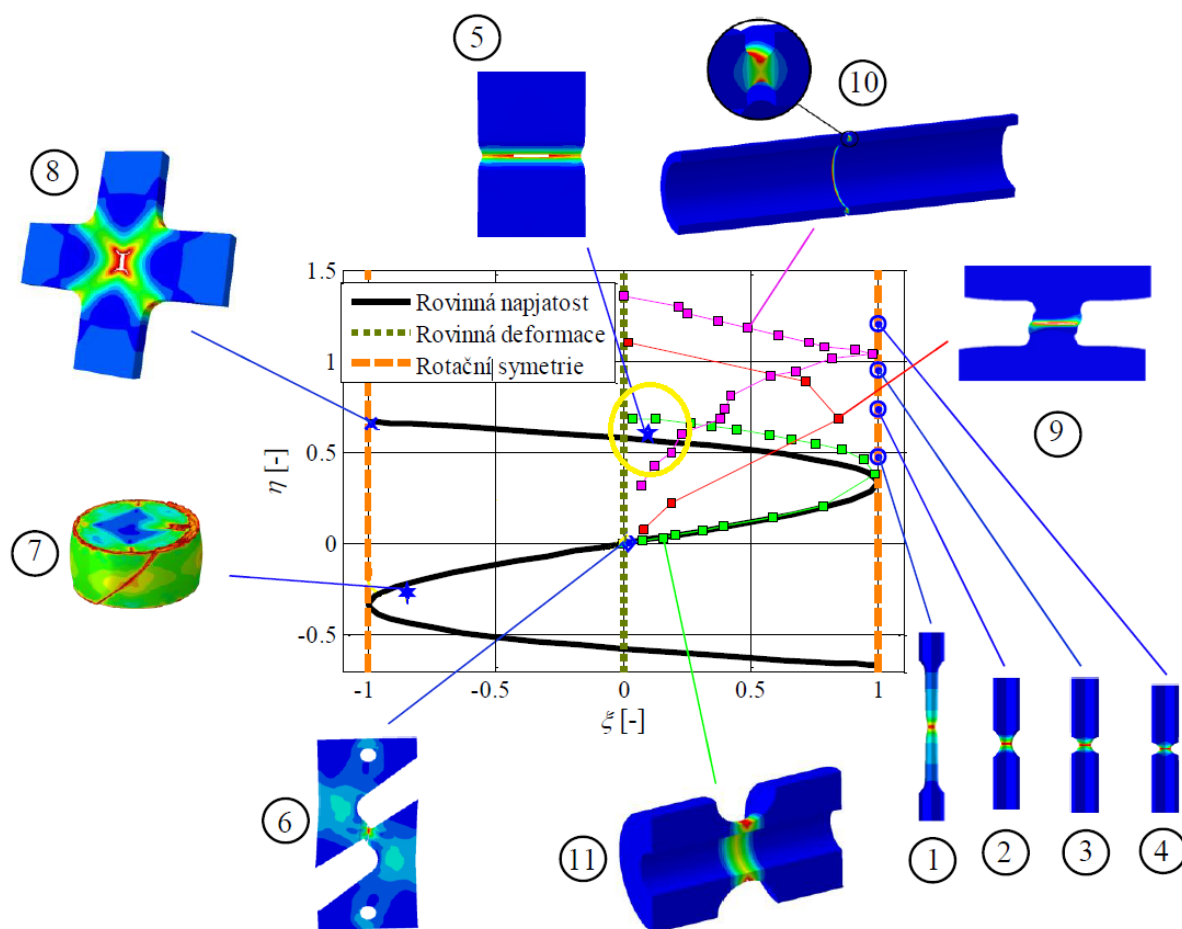
Střední hodnoty jsou zobrazeny na obr. 9.35. Kontrola Lodeho parametru ukázala, že při tahové zkoušce se pohybujeme v hodnotách s větším lomovým přetvořením. Je tedy teoreticky možné, že by k porušení dojít mohlo.



Obr. 9.35 Srovnání středních hodnot Lodeho parametru

## 10. NÁVRH VHODNÝCH KALIBRAČNÍCH TĚLES

Pro korektní vyhodnocení je třeba kritéria kalibrovat experimenty s vhodnými zkušebními tělesy. Volba těchto těles není vůbec jednoduchá a provedení potřebného počtu experimentů vyžaduje mnoho času, zkušeností a často bývá i finančně nákladné. Studium kalibračních těles se ve své práci zabýval Kubík [20]. Výstup z jeho pokusů by tak mohl být použit jako odhad při volbě vhodného kalibračního tělesa. V případě rovinné deformace nebo čistého smyku je Lodeho parametr  $\mu$  i normalizovaný třetí invariant deviátoru napětí  $\xi$  roven nule. Ze simulace ohýbání vychází hodnota Lodeho parametru velmi blízká nule a proto ji lze přímo porovnávat s hodnotou normalizovaného třetího invariantu deviátoru napětí z obr. 10.1.



Obr. 10.1 Porovnání parametrů  $\xi$ ,  $\eta$  u kalibračních těles [20]

V zakroužkované oblasti se nachází tělesa, která svými parametry odpovídají simulaci ohýbání a proto by právě tato tělesa mohla být použita k lepší kalibraci kritérií porušování. Jde o zkušební vzorky 5 (tahová zkouška plechu opatřeného dvěma symetrickými vruby), 10 (trubka opatřena dvěma kruhovými vruby, zatížena tahem a krutem) a 11 (modifikace tělesa Lindholmova typu). Nejvhodnější by pak bylo pravděpodobně těleso 5, jelikož jde o plech stejně jako u ohýbání a proto by byla výroba zkušebního vzorku nejjednodušší.

## 11. ZÁVĚR

Hlavním cílem závěrečné práce bylo ověření, zda současné nastavení technologického procesu ohýbání vede k výrobku bez povrchového porušení. Předmětem byly hliníkové přípojnice, které slouží jako vodič elektrické energie. Firma Siemens, s.r.o. tyto přípojnice vyrábí ohýbáním 7 mm tlustého plechu do různých úhlů. V případě ohybu do 90° však dochází k porušení na vnější straně ohybu. Ověření bylo požadováno jak pomocí analytických a empirických vztahů, tak numerickou simulací v některém z volně dostupných konečnoprvkových softwarů.

V první části práce byl čtenář seznámen se samotným výrobkem, jeho použitím a výhodami oproti běžným kabelovým vodičům.

Následovala kapitola věnovaná teorii ohýbání. V ní bylo popsáno vše podstatné pro vyhodnocení výsledků. Pro porovnání s výsledky numerické simulace zde byly vykresleny teoretické průběhy napětí při ohýbání a také následného zbytkového napětí po odlehčení. Dále zde byly vysvětleny pojmy jako neutrální plocha nebo úhel odpružení. Pro analytické ověření byly uvedeny vztahy pro výpočet minimálního vnějšího poloměru ohybu.

Kapitola 4.3. se zabývá samotnou teorií porušování. Obsahuje vysvětlení jednoho z nejdůležitějších vstupů do elastoplastických simulací a to křivky zpevnění neboli „flow curve“. Dále jsou zde zmíněna některá kritéria porušení pro vyhodnocení výsledků.

Jelikož bylo požadováno provést simulaci ve volně dostupném prostředí, byl čtenář seznámen s nepříliš známým open-source softwarem Salome-Meca. Lze zde najít stručně popsané jednotlivé moduly nebo možnosti tvorby skriptu pro spuštění výpočtu.

V kapitole věnované analytickému řešení proběhl výpočet minimálního poloměru vnějšího ohybu a ten pak byl srovnán s poloměrem, který byl reálně naměřen na ohnuté součásti. Z výpočtu vyšel poloměr  $R_{1min} = 26,5 \text{ mm}$ , zatímco naměřena byla hodnota  $R_{1sk} = 15 \text{ mm}$ . Z toho lze usoudit, že k porušení by mělo dojít, jelikož se reálně pohybujeme hluboko pod hranicí kritického poloměru.

Pro numerickou simulaci bylo potřeba kromě geometrie a okrajových podmínek vytvořit křivku zpevnění. K tomu bylo nutné nasimulovat tahovou zkoušku a vstupní materiálovou křivku určit podle výstupní silové odezvy. Po dosažení akceptovatelné chyby jsme získali křivku bez zpevnění. Z tohoto důvodu se nepodařilo konvergovat síť a získat kritickou hodnotu přetvoření. Jelikož pro vyhodnocení bylo zvoleno kritérium redukovaného plastického přetvoření, byly porovnávány hodnoty přetvoření pro stejnou velikost prvku. Graf srovnávající výsledky je na straně 70 a ukazuje, že při jakékoliv velikosti prvku jsou přetvoření při ohýbání stále pod kritickou hodnotou. Kritérium redukovaného plastického přetvoření však nijak nezohledňuje triaxialitu ani Lodeho parametr. Porovnávány tak mohou být jen hodnoty při stejných napěťových stavech. Tyto dva parametry tedy byly vykresleny jak pro 2D tak i 3D úlohu a srovnány s průběhem při tahové zkoušce. Grafy průběhů jsou na stranách 70 a 71 a ukazují, že o stejný napěťový stav se nejedná. Po vyhodnocení proto byly doporučeny experimenty, které by měly lépe vystihnout napěťový stav při ohybu a v případě pokračování v tomto problému tak poskytnout lepší údaje pro jeho zpracování.

## 12. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DOWLING, Norman E. Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN 01-313-9506-8.
- [2] Siemens [online]. [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <https://www.siemens.com>
- [3] Siemens [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz>
- [4] Siemens. Integrované řešení pro spolehlivý a účinný rozvod elektrické energie. [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupný z: [www.siemens.com/busbar](http://www.siemens.com/busbar)
- [5] DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. Technologie tváření : plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno : CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [6] FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. VUT Brno : CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [7] DVOŘÁK, Milan, et al. Technologie II. VUT Brno : CERM, 2001. 238 s. ISBN 80- 214-2032-4.
- [8] LENFELD, Petr. Technologie plošného tváření - ohýbání [online]. [2005] [cit. 2017-02-20]. Dostupný z WWW: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm)
- [9] VALČÍK Jan: Návrh výroby součásti ohýbáním. Brno, 2010. 62 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing.Kamil Podaný, Ph.D.
- [10] ŠEBEK, F. Rovnání vývalku opakovanou plastickou deformací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 35 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
- [11] MARCINIAK, Zdzislaw. Teorie tváření plechů. Praha: SNTL, 1964, 259 s
- [12] ČUPR, Pavel. Název: Výpočtová simulace rovnání tyčí nekruhového průřezu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 79 s., 1 příloha. Vedoucí práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
- [13] BENEŠOVSKÝ, M. Výpočtová simulace kosoúhlého rovnání tyčí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 105 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc..
- [14] KRÁLÍČEK, T. Odpružení a mezní stav při ohýbání titanové slitiny používané v leteckém průmyslu. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2008. 72 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
- [15] HŮLKA, J. Aplikace modelů tvárného porušování při výpočtové simulaci technologických operací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 84s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
- [16] P. Bridgman, "Studies in large plastic flow and fracture," p. 188, 1964.

- [17] G. Mirone, "A new model for the elastoplastic characterization and the stress-strain determination on the necking section of a tensile specimen," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 41, no. 13, pp. 3545–3564, Jun. 2004.
- [18] Z. Zhang, M. Hauge, J. Odegard, "Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 36, no. 9919, pp. 3497– 3516, 1998.
- [19] HŮLKA, J. Výpočtová predikce tvárného porušování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 119 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
- [20] KUBÍK, P. Implementace, kalibrace a využití podmínek tvárného lomu v programech MKP. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 106 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc..
- [21] Oh S. I., Chen C. C., Kobayashi S. Ductile failure in axisymmetric extrusion and drawing. *Journal of Engineering for Industry*, 1979, vol. 101, pp. 36-44.
- [22] Cockcroft M. G., Latham D. J. Ductility and the workability of metals. *International Journal of the Institute of Metals*, 1968, vol. 96, pp. 33-39.]
- [23] ANDĚL, T. Využití vypočtového prostředí Salome Meca při řešení uloh mechaniky těles. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D.
- [24] AUBRY, Jean-Pierre. Beginning with Code\_Aster. A Practical Introduction to Finite Element Method Using Code\_Aster, Gmsh and Salome. Framasoft, 2013. ISBN 9791092674033.
- [25] FREE SOFTWARE FOUNDATION. GNU Operating System [online]. 2001,[cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.gnu.org/>
- [26] SALOME [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.salome-platform.org>
- [27] Code\_Aster [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.code-aster.org>
- [28] CAE Linux [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://caelinux.com>
- [29] JANÍČEK, P. Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky. Hledání souvislostí. Učební texty I. Brno: CERM, VUTIU, 2007. 735 s. ISBN: 978-80-7204-555- 6.
- [30] JANÍČEK, P. Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky. Hledání souvislostí. Učební texty II. Brno: CERM, VUTIU, 2007. 617 s. ISBN: 978-80-7204-556- 3.
- [31] Wierzbicki T., Bao Y., Lee Y.-W., Bai Y. Calibration and evaluation of seven fracture models. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, vol. 47, pp. 719-743.
- [32] Bai Y. Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International Journal of Plasticity*, 2008, vol. 24, pp. 1071-1096.]



- [33] JENÍK, I. Identifikace parametrů elasto-plastických modelů materiálu z experimentálních dat. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Kubík.



### 13. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Veličina
$a$	[mm]	vzdálenost od neutrální osy
$a_{1-6}$	[mm]	délka hrany prvku
$b$	[mm]	šířka materiálu
$l$	[mm]	délka ohnutého úseku na vnější straně ohybu
$l_0$	[mm]	délka ohnutého úseku v neutrální ploše
$n$	[–]	exponent zpevnění
$n_{1-5}$	[–]	počet prvků na hraně
$r$	[mm]	poloměr zaoblení hran plechu
$t$	[mm]	tloušťka materiálu
$x$	[–]	součinitel posunutí neutrální plochy
$z_r$	[–]	součinitel rozšíření
$z_z$	[–]	součinitel ztenčení
$A$	[%]	tažnost
$A, B, C, l$	[–]	materiálové konstanty
$D$	[–]	lomový parametr
$D_{CLO}$	[–]	konstanta kritéria Cockcroft-Lathan-Oh
$D_{1-5}$	[–]	metariálové konstanty
$E$	[MPa]	modul pružnosti v tahu
$F$	[N]	působící síla
$L$	[mm]	délka vzorku po deformaci
$L_u$	[mm]	rameno ohybu (U ohyb)
$L_v$	[mm]	vzdálenost mezi opěrami ohybnice (V ohyb)
$L_0$	[mm]	počáteční délka vzorku
$M_{el}$	[Nmm]	moment vyvolávající napětí na mezi kluzu
$M_{elp}$	[Nmm]	moment vyvolávající elastoplastické napětí
$M_o$	[Nmm]	ohybový moment
$M_{pl}$	[Nmm]	moment vyvolávající plastický kloub
MW	[mm]	vstupní šířka ohybnice
$R_e$	[MPa]	mez kluzu
$R_{oh1}$	[mm]	poloměr ohybníku
$R_{oh2}$	[mm]	vstupní zaoblení ohybnice

---

$R_0$	[mm]	poloměr vnitřního ohybu
$R_1$	[mm]	poloměr vnějšího ohybu
$R_{1max}$	[m]	maximální poloměr vnějšího ohybu aby došlo
$R_{1min}$	[mm]	minimální poloměr vnějšího ohybu
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	počáteční průřez vzorku
$T$	[K]	aktuální teplota
$T_{melt}$	[K]	teplota tavení
$T_{room}$	[K]	referenční teplota
$T^*$	[–]	homologická teplota
$W_o$	[mm <sup>3</sup> ]	modul průřezu v ohybu
$\alpha$	[°]	úhel ohybu
$\alpha_{oh1}$	[°]	úhel ohybníku
$\alpha_{oh2}$	[°]	úhel ohybnice
$\beta$	[°]	úhel odpružení
$\varepsilon_{eng}$	[–]	smluvní (inženýrské) přetvoření
$\varepsilon_{real}$	[–]	skutečné (logaritmické) přetvoření
$\bar{\varepsilon}_f$	[–]	lomové přetvoření
$\varepsilon^p$	[–]	tenzor plastického přetvoření
$\bar{\varepsilon}^p$	[–]	redukováné plastické přetvoření
$\dot{\varepsilon}_0$	[s <sup>-1</sup> ]	referenční rychlost plastického přetvoření
$\dot{\varepsilon}^*$	[–]	bezrozměrná rychlost redukováného plastického přetvoření
$\eta$	[–]	triaxialita
$\eta^{av}$	[–]	střední hodnota triaxiality
$\theta$	[–]	Lodeho úhel
$\bar{\theta}$	[–]	normalizovaný Lodeho úhel
$\mu$	[–]	Lodeho parametr
$\xi$	[–]	normalizovaný třetí invariant deviátoru napětí
$\rho$	[mm]	poloměr neutrální plochy
$\sigma_{el}^*$	[MPa]	fiktivní elastické napětí
$\sigma_{eng}$	[MPa]	smluvní (inženýrské) napětí
$\sigma_k$	[MPa]	napětí odpovídající mezi kluzu
$\sigma_m$	[MPa]	střední napětí

---

$\sigma_{real}$	[MPa]	skutečné napětí
$\sigma_{rez}$	[MPa]	zbytkové (reziduální) napětí
$\sigma_y$	[MPa]	normálové napětí ve směru osy $y$
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	[MPa]	hlavní napětí
$\bar{\sigma}$	[MPa]	redukované napětí
$\varphi$	[°]	úhel ohnutého úseku od původní roviny
$\Delta L$	[mm]	změna délky vzorku